



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2025. Т. 25, вып. 3. С. 333–342

Izvestiya of Saratov University. Physics, 2025, vol. 25, iss. 3, pp. 333–342

<https://fizika.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-3-333-342>, EDN: OQWITA

Научная статья
УДК 530.182:537.86



Исследование воздействия электрических импульсов на микроциркуляцию крови артериальных сосудов методом лазерной доплеровской флюметрии

В. Д. Прохорова¹, О. Ю. Кутикова¹, А. М. Палагута¹, Ан. В. Скрипаль^{1✉}, Д. В. Ермишин², А. П. Рытик¹

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

²ООО «Клевер», Россия, 410012, г. Саратов, ул. Аткарская, д. 66А

Прохорова Вероника Дмитриевна, студент, nika_dmit@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-1632-649X>

Кутикова Оксана Юрьевна, аспирант, Oksana.296@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5976-2972>

Палагута Алексей Михайлович, аспирант, palaguta.lex.m@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0004-8120-1230>

Скрипаль Анатолий Владимирович, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой медицинской физики, skripal1@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9080-0057>

Ермишин Дмитрий Владимирович, директор по развитию, dimerm@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-7223-9234>

Рытик Андрей Петрович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры медицинской физики, ra4csz@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2911-4055>

Аннотация. Методом лазерной доплеровской флюметрии исследовано влияние воздействия низковольтных электрических импульсов на функционирование артериальных сосудов предплечья человека. Метод включает измерение показателя микроциркуляции крови по допплеровскому сдвигу частоты при зондировании микроциркуляторного русла лазерным излучением (регистрируется излучение, отраженное как от подвижных, так и неподвижных компонентов ткани). Показано, что при воздействии электрических импульсов происходит увеличение миогенной компоненты спектра относительно фоновой пробы в среднем в 4 раза, что связано с изменением тонуса сосудистой стенки артериол. Выявлено также преобладание нейрогенных компонент спектра после прекращения воздействия электрических импульсов. Показано, что использование метода лазерной доплеровской флюметрии по амплитудам спектральных гармоник ритмов колебаний сосудов позволяет количественно определять изменения в регуляции кровотока при воздействии импульсов тока.

Ключевые слова: лазерная доплеровская флюметрия, электрические импульсы, микроциркуляция крови, артериальные сосуды, тонус

Благодарности: Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-14-00287, <https://rscf.ru/project/23-14-00287/>).

Для цитирования: Прохорова В. Д., Кутикова О. Ю., Палагута А. М., Скрипаль Ан. В., Ермишин Д. В., Рытик А. П. Исследование воздействия электрических импульсов на микроциркуляцию крови артериальных сосудов методом лазерной доплеровской флюметрии // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2025. Т. 25, вып. 3. С. 333–342. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-3-333-342>, EDN: OQWITA

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

Article

Study of the influence of electrical impulses on arterial blood microcirculation using laser Doppler flowmetry

V. D. Prokhorova¹, O. Yu. Kutikova¹, A. M. Palaguta¹, An. V. Skripal^{1✉}, D. V. Ermishin², A. P. Rytik¹

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

²Clover LLC, 66A Atkarskaya St., Saratov 410012, Russia

Veronika D. Prokhorova, nika_dmit@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-1632-649X>

Oksana Yu. Kutikova, Oksana.296@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5976-2972>

Alexey M. Palaguta, palaguta.lex.m@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0004-8120-1230>

Anatoly V. Skripal, skripal1@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9080-0057>

Dmitry V. Ermishin, dimerm@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-7223-9234>

Andrey P. Rytik, ra4csz@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2911-4055>

Abstract. Background and Objectives: The influence of low-voltage electrical current impulses on arterial blood microcirculation was investigated using the method of laser Doppler flowmetry. **Materials and Methods:** The method involves measuring the blood microcirculation index by quantifying the Doppler frequency shift arising when the microcirculatory bed is probed with laser radiation, followed by the registration of radiation reflected from both moving and stationary tissue components. **Results:** It has been demonstrated that exposure to electrical current impulses leads to an average 4-fold increase in the myogenic component of the spectrum relative to the baseline sample. This increase is associated with changes in the tone of the vascular wall in blood arterioles. The predominance of neurogenic components of the spectrum after cessation of exposure to electrical impulses has also been revealed. **Conclusion:** Utilizing the laser Doppler flowmetry method based on the amplitudes of spectral harmonics of vascular oscillation rhythms allows to determine quantitatively the changes in blood flow regulation during exposure to current impulses.

Keywords: laser Doppler flowmetry, electrical impulses, blood microcirculation, arterial vessels, muscle tone

Acknowledgments: The work was supported by the Russian Science Foundation (project No. 23-14-00287, <https://rscf.ru/project/23-14-00287/>).

For citation: Prokhorova V. D., Kutikova O. Yu., Palaguta A. M., Skripal An. V., Ermishin D. V., Rytik A. P. Study of the influence of electrical impulses on arterial blood microcirculation using laser Doppler flowmetry. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2025, vol. 25, iss. 3, pp. 333–342 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-3-333-342>, EDN: OQWITA

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

Введение

В мире наблюдается рост частоты заболеваний сердечно-сосудистой системы и нарушений кровообращения, связанных с нарушением нормальной работы кровеносных сосудов и тока крови [1–3]. Для лечения заболеваний данной этиологии, а также различных видов мышечной дисфункции прибегают к нервно-мышечной электростимуляции [4–12].

В работе [4] приведены примеры воздействия электростимуляции на мышцы опорно-двигательной системы для возобновления нормальных сокращений скелетных мышц при лечении мышечной атрофии. Стимуляцию выполняли током частотой 10 Гц. Режим стимуляции включал воздействие импульсами тока в течение 20 с с последующим покоя в течение 20 с. Длительность импульсов составляла 100 мс, максимальная амплитуда стимуляции – 60 мА. Первый сеанс стимуляции начинался с более низких амплитуд (порядка 30 мА) и постепенно увеличивался на 10–15 мА ежесуточно в течение следующих 2–4 дней, пока не было достигнуто конечное значение 60 мА, которое хорошо переносилось пациентами. Было показано, что низкочастотная электростимуляция увеличивает мышечную силу и улучшает кровоснабжение у пациентов с хронической сердечной недостаточностью.

В работах [5, 6] оценивалась эффективность электрической стимуляции скелетных мышц на основе анализа динамики кровообращения, сокращения и гипертрофии мышц. Использовалась стимуляция импульсами электрического тока прямоугольной формы длительностью 1–1.5 мс с частотой 20 Гц. Выходное напряжение стимулятора было ограничено 80 В, что не вызы-

вало дискомфорта. Один из отмеченных эффектов электростимуляции – увеличение скорости утилизации глюкозы в мышцах (анаэробный гликолиз), что, как предполагалось, может стать терапевтическим средством для улучшения метаболизма глюкозы у людей [6], а также для улучшения мышечной силы и кровоснабжения при хронической сердечной недостаточности [5].

В статьях [7, 8] отмечено влияние нервно-мышечной электростимуляции на гемодинамику, аритмию и подъязычную микроциркуляцию. Параметры электрического импульса: частота – 20 Гц, длительность импульса – 250 мкс. Использовался экспоненциально нарастающий импульс для уменьшения дискомфорта во время стимуляции мышц. Показано, что данный метод терапии безопасен и эффективен для снижения уровня глюкозы в крови и повышения уровня лактата в крови без изменения текучести крови или микроциркуляции.

Основной проблемой реабилитации у людей с ограниченной подвижностью является давление атрофии скелетных мышц и снижение двигательной функции. Авторы работы [9] изучили безопасность влияния электростимуляции на динамику кровообращения, аритмию, микроциркуляцию, системный метаболизм, включая уровень глюкозы в крови, уровень лактата и окислительный стресс. Показано, что электростимуляция изменила уровень лактата в крови, однако она не изменила гемодинамические параметры и не вызвала аритмию. Тем не менее, авторы отмечают необходимость проведения более глубоких исследований влияния электростимуляции на пациентов с хроническими

заболеваниями сердца или хронической дыхательной недостаточностью.

В [10] отмечается малоизученный аспект влияния мозгового кровотока при применении электростимуляции к крупным мышцам нижних конечностей изучено недостаточно. В этой работе интересна гипотеза о включении электростимуляцией регуляторных механизмов нервной системы. Электростимуляция увеличивает кровоток в сонной артерии, однако влияние стимуляции на церебральную перфузию различается в переднем и заднем отделах мозгового кровообращения. Можно также отметить ряд обзорных работ по электростимуляции [11–13], в которых проведена систематизация параметров воздействия: частота и ширина импульса тока, интенсивность, режим воздействия. В большинстве случаев величина тока варьировалась от 10 до 200 мА, а интенсивность импульса зависела от терапевтической задачи.

Гемодинамические эффекты привыкания к недельной программе нервно-мышечной электростимуляции были отмечены в [14]. Здесь для каждого испытуемого был проведен 30-минутный сеанс терапии током в течение 4-х недель (5 дней в неделю). Сила тока была настроена таким образом, чтобы обеспечить максимальное взаимное разгибание и сгибание запястья и пальцев без боли, а рабочий цикл составлял 10 с при включении и 5 с при выключении. Во время каждого сеанса выполнялось около 60 циклов разгибания и сгибания запястья. Стимулирующий импульс представлял собой двухфазный сигнал с амплитудой от 10 до 40 мА с длительностью импульса 300 с и частотой 35 Гц. В результате регулярных физиопроцедур электростимуляции объемы выброса крови и пиковые скорости кровотока в подколенной вене поддерживались в течение 30-минутного сеанса стимуляции и увеличивались примерно на 100% в течение последующих семи дней. Средняя интенсивность стимуляции постепенно увеличивалась в течение недели, в то время как ощущаемая боль во время воздействия значительно снизилась. В конечном счете привыкание пациентов к электростимуляции привело к получению самого высокого объема венозного выброса, зарегистрированного при однократном сокращении икроножных мышц.

В большинстве случаев работы, посвященные использованию электростимуляции в терапии, имеют акцент на подборе параметров

воздействия и достигнутом терапевтическом эффекте [14, 15]. Однако представляет интерес аспект объективного инструментального подтверждения изменений протекания физиологических процессов в тканях. Прежде всего нами рассмотрены изменения в регуляции кровотока по амплитудам спектральных гармоник при воздействии импульсов тока, а также изменение тонуса сосудистой стенки кровеносных артериол. В работе использован метод лазерной доплеровской флюметрии [16, 17].

Целью работы явилось определение характера влияния импульсной электростимуляции на динамику кровотока в сосудах предплечья человека методом лазерной доплеровской флюметрии. В задачи работы входило выявление особенностей регуляции кровотока в артериальных сосудах до, во время и после воздействия электрических импульсов. В частности, исследовалось сохранение эффекта изменения регуляции кровотока после выключения электростимуляции.

Метод исследования

В качестве метода исследования применялась лазерная доплеровская флюметрия (ЛДФ). Этот метод является общепризнанным неинвазивным методом измерения перфузии крови микрососудистого русла [18]. Использование вейвлет-преобразования ЛДФ-граммы позволяет анализировать амплитудно-частотные характеристики вазомоторной [19]. Частоты колебаний лежат в определенных границах в зависимости от происхождения этих колебаний. Самыми низкочастотными считаются эндотелиальные колебания (0.0095–0.02 Гц), затем следуют нейрогенные (0.021–0.046 Гц), миогенные (0.047–0.145 Гц), дыхательные (0.2–0.4 Гц) и сердечные (0.8–1.6 Гц) [18]. Наряду с измерением базового уровня перфузии для изучения кожной микроциркуляции крови с помощью ЛДФ применяются различные функциональные пробы. Они позволяют повысить информативность исследования за счет оценки дополнительного вовлечения регуляторных механизмов посредством внешних стимулов. В ряде работ метод ЛДФ используется для оценки микроциркуляции крови при различной функциональной нагрузке или заболеваниях [20, 21]. Так величина снижения базального кровотока при функциональной пробе позволяет определить уровень реактивности микрососудов.



В данной работе показания микроциркуляции измерялись с помощью портативного ЛДФ устройства «ЛАЗМА ПФ» (Россия) [22], в котором применяется одночастотный лазер мощностью излучения 0.7 мВт и с длиной волны 850 нм. Глубина проникновения в кожу составляет около 1–1.2 мм [23].

Для электростимуляции использовалось устройство, которое уже успешно применялось в исследованиях терапии пиелонефрита (рис. 1) [24, 25].

Параметры импульсов могли изменяться по амплитуде (от 0 до 100 вольт в импульсе) и частоте следования в диапазоне от 50 до 100 мкс, также в программной части устройства можно было установить различные режимы воздействия: время воздействия – время паузы. Значения тока были подобраны исходя из различной чувствительности и комфорtnости (без болевых ощущений и сильных, спазматических, мышечных сокращений) группы испытуемых. Форма импульса биполярная, с чередованием: положительный-отрицательный импульсы изменяются на отрицательный-положительный. Таким образом, биполярный импульс исключает разделение ионов в тканях, свойственное ионо- и электрофорезу. Амплитуда импульсов составляла в среднем 50 вольт, значение тока было зафиксировано на уровне 23 мА. Фронт и спад импульса составляет 270–300 нсек, что обеспечивает хорошую проводимость даже при сухой коже. Площадь электродов 16 кв.см. (4×4 см) обеспечивает при этом необходимую и достаточную емкость. Перед процедурой проводилось увлажнение кожи дезинфицирующим раствором.

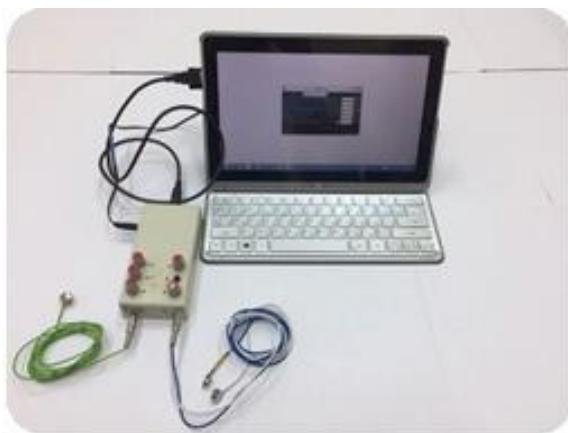


Рис. 1. Прибор, генерирующий электрические импульсы

Fig. 1. Device generating electrical pulses

Для проведения исследования набирали группу из 30 добровольцев возраста 16–19 лет. Накладывали два электрода прибора на предплечье для генерации электрических импульсов; на указательный палец руки надевали ЛДФ-датчик. Выполняли фоновую запись в течении 3 минут, затем включали фиксированную по параметрам последовательность импульсов тока 50 В с частотой 30 кГц и проводили воздействие в течении 3 минут, затем выключали воздействие тока и записывали ЛДФ-грамму после воздействия. Характер протекания микроциркулярных процессов отражает рис. 2. Состояние покоя пациента способствовало понижению как активных, так и пассивных факторов влияния на регуляцию кровотока. Были проведены три серии измерений параметров микроциркуляции (ЛДФ-спектров): до воздействия (фоновый режим), во время воздействия импульсов тока и после воздействия. Затем выполнялась запись ЛДФ-граммы после выключения воздействия электроимпульсов. Важной задачей являлось обнаружение кумулятивного эффекта продолжения воздействия импульсов тока. После записи проб – фоновой, в процессе токовой стимуляции и после стимуляции – выполняли анализ амплитуды частотных компонент сигнала ЛДФ с сегментацией по составляющим спектра (рис. 3).

Из рис. 3 видно, что при отсутствии воздействия амплитуды нейрогенного спектра – 1.9 и миогенного спектра – 1.19 (в относительных единицах, отн. ед.) отражают больший вклад активных компонент в регуляцию объемного кровотока микроциркуляторного русла по сравнению с пассивными компонентами –



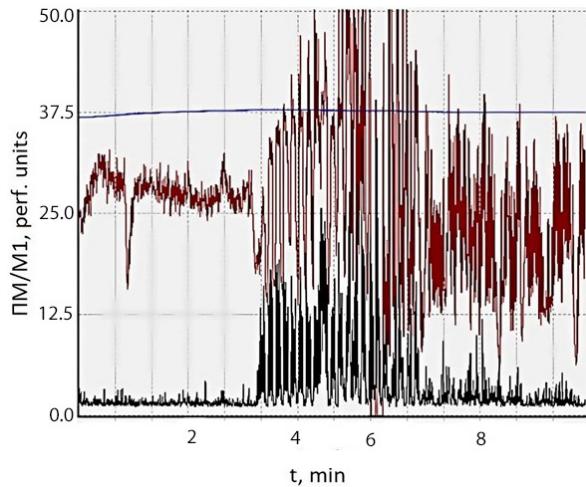


Рис. 2. ЛДФ-грамма изменения микроциркуляции пациента Г. (возраст 19 лет) при воздействии электрического тока начиная со 2-й минуты при амплитуде импульсов 50 В и частоте 30 кГц. Показатель микроциркуляции (красная линия), сигнал датчика движения (черная линия), кривая температуры (синяя линия) (цвет онлайн)

Fig. 2. LDF gram of microcirculation change when exposed to the electric current starting from 2 minute with pulse amplitude of 50 volts and frequency of 30 kHz, patient G., age 19 years. Microcirculation indicator (red line), motion sensor signal (black line), temperature curve (blue line) (color online)

дыхательной и сердечной компонент спектра, амплитуды которых соответственно равны 0.49 и 0.64 отн. ед.

При воздействии электрическими импульсами характер ритмов кровотока демонстрирует повышение амплитуды миогеной гармоники спектра до 9.15 ед. Также наблюдается увеличение амплитуды нейрогенной (8.03 отн. ед.), сердечной (4.92 отн. ед.) и дыхательной компонент спектра (5.28 отн. ед.) (рис. 4). Такие высокие значения амплитуд колебаний спектра обусловлены скорее реакцией вегетативной нервной системы на внешнее воздействие, чем реакцией системы миогенной регуляции кровотока.

В ходе исследования было зафиксировано продолжение эффекта реакции сосудистой системы после воздействия электрических импульсов, продолжительность которого составляла от 30 с до 15 мин для различных обследуемых. На рис. 5 приведен спектр ЛДФ-сигнала после воздействия импульсов тока. Видно, что амплитуды нейрогенной (3.57 отн.ед.), миогенной (3.30 отн.ед.), дыхательной (1.98 отн.ед.) и сер-

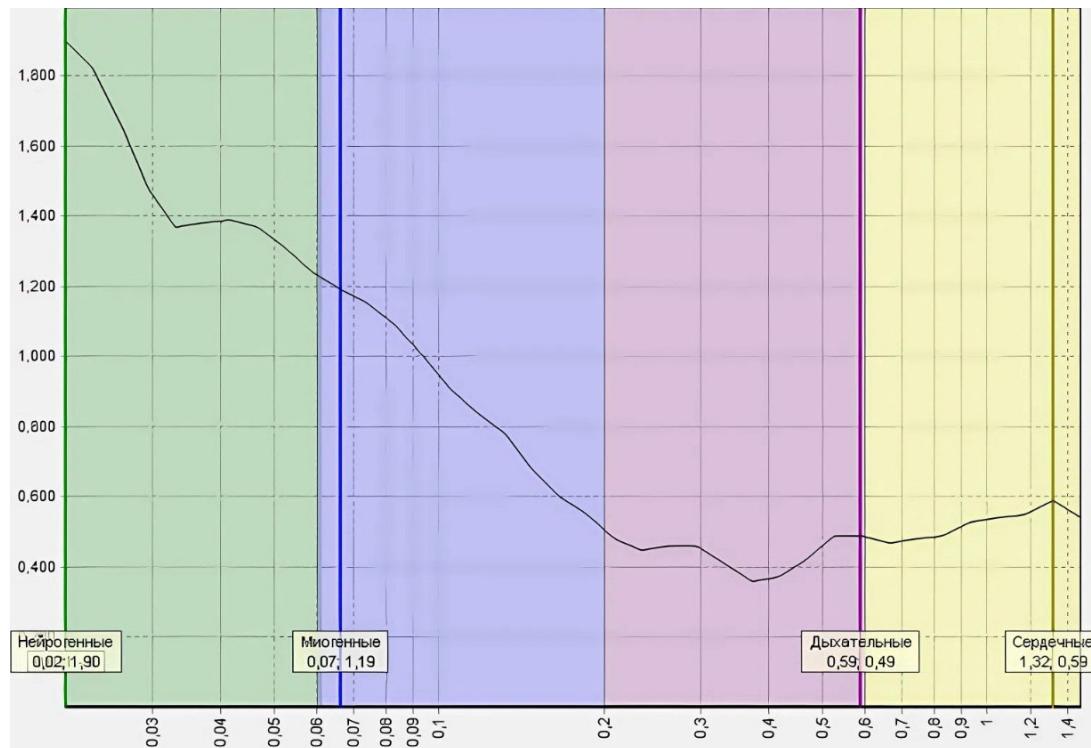


Рис. 3. Спектр ЛДФ фоновой пробы пациента Г. (возраст 19 лет) (амплитуда спектра ЛДФ-сигнала показана в отн. ед., частота – в Гц) (цвет онлайн)

Fig. 3. LDF spectrum of background sample, patient G., age 19 years (the amplitude of the spectrum of the LDF signal is in relative units, the frequency is in Hz) (color online)

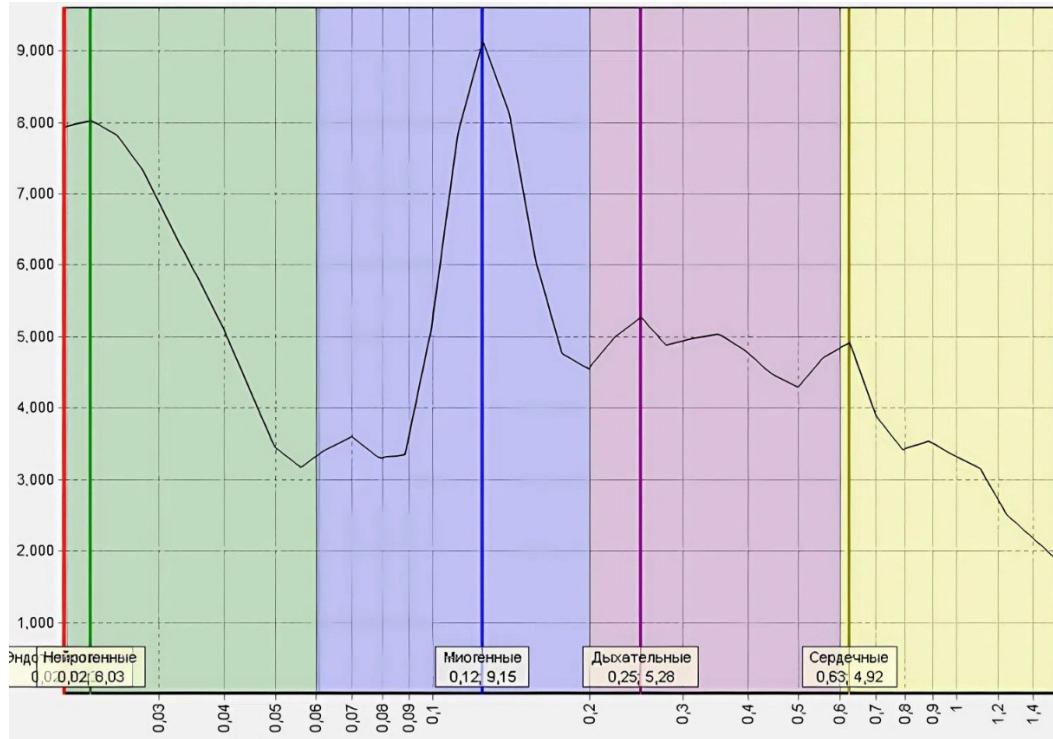


Рис. 4. Спектр ЛДФ-сигнала при воздействии электрического тока, пациента Г., возраст 19 лет (амплитуда спектра ЛДФ-сигнала показана в отн. ед., частота – в Гц) (цвет онлайн)

Fig. 4. Spectrum of the LDF signal under electric current exposure, patient G., age 19 years (the amplitude of the spectrum of the LDF signal is in relative units, the frequency is in Hz) (color online)

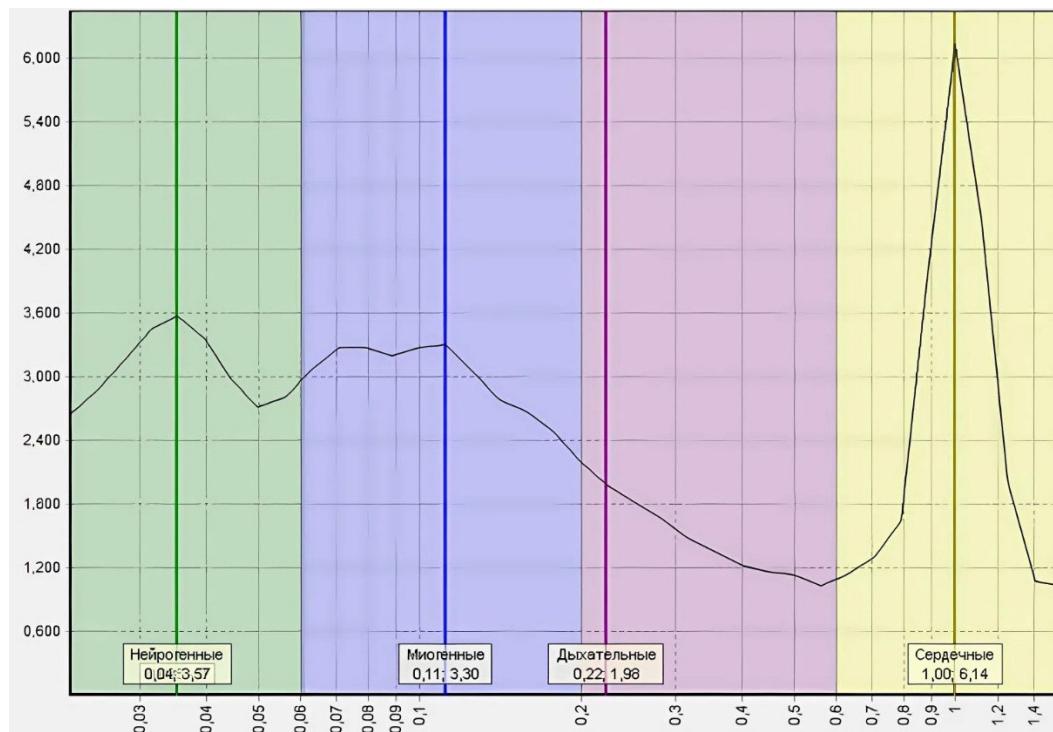


Рис. 5. Спектр ЛДФ-сигнала после воздействия, пациента Г., возраст 19 лет (амплитуда спектра ЛДФ сигнала в отн. ед., частота – в Гц) (цвет онлайн)

Fig. 5. LDF spectrum after exposure, patient G., age 19 years (the amplitude of the spectrum of the LDF signal is in relative units, the frequency is in Hz) (color online)



дечной (6.14 отн.ед.,) компонент спектра имеют повышенное значение по сравнению с фоном.

Результаты воздействия импульсов тока на группу из 30 добровольцев приведены на рис. 6.

Как видно из рис. 6, усредненное значение (по 30 испытуемым) амплитуды миогенной гармоники ЛДФ-спектра после воздействия электрических импульсов составило 2.08 отн. ед., во время электростимуляции – 5.89 отн. ед., а при значениях до стимуляции – 1.44 отн. ед. Фактически в момент электростимуляции амплитуда миогенной гармоники спектра была в 4 раза больше, чем без воздействия импульсов тока. Такие изменения показаний миогенной составляющей свидетельствуют о том, что изменяется тонус сосудистой стенки кровеносных артериол и в целом перфузия тканей при электростимуляции. Существенное увеличение амплитуд нейрогенных колебаний является индикатором снижения сопротивления микроциркуляторного русла.

Как следует из рис. 6, после воздействия электрических импульсов в ритмах колебаний кровотока преобладает нейрогенная компонента, что говорит о повышенной активности симпатической части вегетативной нервной системы (ВНС). В целом наибольшее изменение амплитуды демонстрирует миогенная и нейрогенная части спектра во время электростимуляции и по-

сле нее. Это говорит об увеличение уровня перфузии тканей относительно фона, что может быть связано с включением и активизацией кровотока в микроциркуляторном русле.

Заключение

В ходе исследования было выявлено, что в большинстве случаев при воздействии электрических импульсов повышается амплитуда миогенной компоненты спектра функционирования сосудистой стенки. Амплитуды остальных гармоник спектров также возрастают, но в меньшей степени. Полученные результаты определяют основу для корректного применения физиопроцедуры при электростимуляции гладких мышц периферических сосудов. Эффективность метода электростимуляции количественно можно оценивать методом ЛДФ, при этом каждая компонента кровотока изучается отдельно.

Список литературы

- Сердечно-сосудистые заболевания. URL: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-\(cvds\)](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-(cvds)) (дата обращения: 12.02.2025)
- Глущенко В. А., Иркlienko Е. К. Сердечно-сосудистая заболеваемость – одна из важнейших проблем здравоохранения // Медицина и организация здравоохранения. 2019. Т. 4, № 1. С. 56–63. EDN: KNGYDV
- Косолапов В. П., Ярмонова М. В. Анализ высокой сердечно-сосудистой заболеваемости и смертности

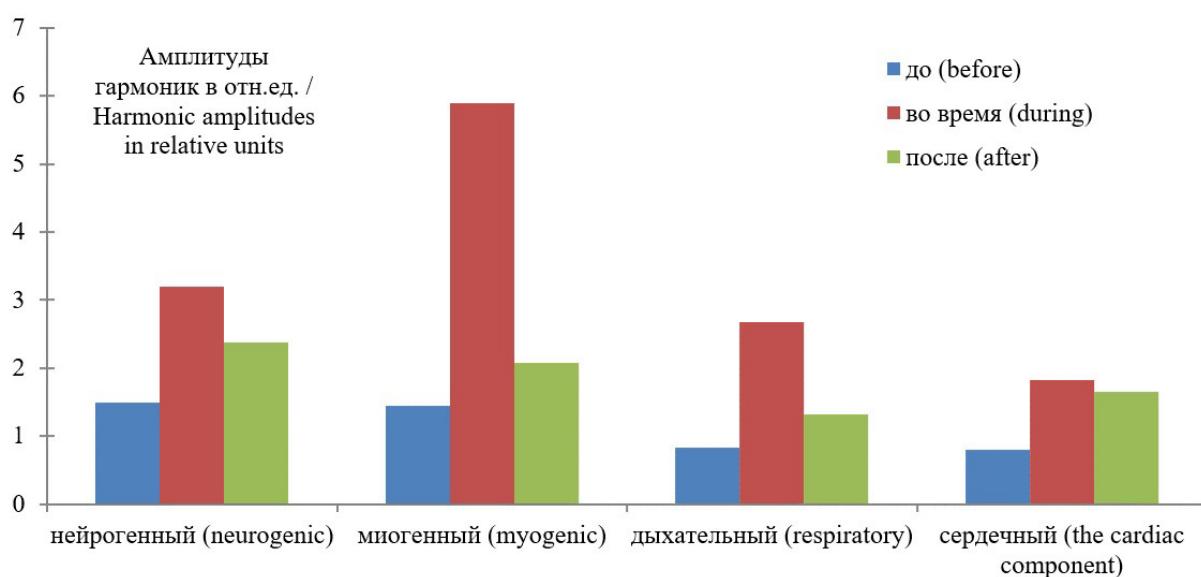


Рис. 6. Усредненные значения амплитуд ЛДФ спектра по 30 испытуемым: миогенный, нейрогенный, дыхательный и сердечный (цвет онлайн)

Fig. 6. Average values of the amplitudes of the LDF spectrum for 30 subjects: myogenic, neurogenic, respiratory and cardiac (color online)

- взрослого населения как медико-социальной проблемы и поиск путей ее решения // Уральский медицинский журнал. 2021. Т. 20, № 1. С. 58–64 <https://doi.org/10.52420/2071-5943-2021-20-1-58-64>
4. Currie J., Ramsbottom R., Ludlow H., Nevill A., Gilder M. Cardio-respiratory fitness, habitual physical activity and serum brain derived neurotrophic factor (BDNF) in men and women // Neurosci. Lett. 2009. Vol. 451. P. 152–155. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2008.12.043>
 5. Dobsák P., Nováková M., Siegelová J., Fiser B., Vítovcov J., Nagasaka N., Kohzuki M., Yambe T., Nitta Shin-ichi, Eicher J.-Ch., Wolf J.-E., Imachi K. Low-frequency electrical stimulation increases muscle strength and improves blood supply in patients with chronic heart failure // Circ. J. 2006. Vol. 70, iss. 1. P. 75–82. <https://doi.org/10.1253/circj.70.75>
 6. Hamada T., Hayashi T., Kimura T., Nakao K., Moritani T. Electrical stimulation of human lower extremities enhances energy consumption, carbohydrate oxidation, and whole body glucose uptake // J. Appl. Physiol. 2004. Vol. 96, iss. 3. P. 911–916. <https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00664.2003>
 7. Hamada T., Sasaki H., Hayashi T., Moritani T., Nakao K. Enhancement of whole body glucose uptake during and after human skeletal muscle low-frequency electrical stimulation // J. Appl. Physiol. 2003. Vol. 94, iss. 6. P. 2107–2112. <https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00486.2002>
 8. Hasegawa S., Kobayashi M., Arai R., Tamaki A., Nakamura T., Moritani T. Effect of early implementation of electrical muscle stimulation to prevent muscle atrophy and weakness in patients after anterior cruciate ligament reconstruction // J. Electromyogr. Kinesiol. 2011. Vol. 21, iss. 4. P. 622–630. <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2011.01.005>
 9. Hoshiai M., Ochiai K., Tamura Y. Effects of whole body neuromuscular electrical stimulation device on hemodynamics, arrhythmia, and sublingual microcirculation // Heart and Vessels. 2021. Vol. 36. P. 844–852. <https://doi.org/10.1007/s00380-020-01755-1>
 10. Ando S., Takagi Y., Watanabe H., Mochizuki K., Sudo M., Fujibayashi M., Tsurugano Sh., Sato K. Effects of electrical muscle stimulation on cerebral blood flow // BMC Neurosci. 2021. Vol. 22. Art. 67. <https://doi.org/10.1186/s12868-021-00670-z>
 11. Hardy E. J., Hatt J., Doleman B., Smart T. F., Piasecki M., Lund J. N., Phillips B. E. Post-operative electrical muscle stimulation attenuates loss of muscle mass and function following major abdominal surgery in older adults: a split body randomised control trial // Age and Ageing. 2022. Vol. 51, iss. 10. Art. afac234. <https://doi.org/10.1093/ageing/afac234>
 12. Mukherjee S., Fok J. R., van Mechelen W. Electrical stimulation and muscle strength gains in healthy adults: A systematic review // Journal of Strength and Conditioning Research. 2023. Vol. 37, № 4. P. 938–950. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000004359>
 13. Filipovic A., Kleinöder H., Dörmann U., Mester J. Electromyostimulation – A systematic review of the influence of training regimens and stimulation parameters on effectiveness in electromyostimulation training of selected strength parameters // Journal of Strength and Conditioning Research. 2011. Vol. 25, № 11. P. 3218–3238. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e318212e3ce>
 14. Wang J.-S., Chen S.-Y., Lan C., Wong M.-K., Lai J.-S. Neuromuscular electric stimulation enhances endothelial vascular control and hemodynamic function in paretic upper extremities of patients with stroke // Archives of Physical Medicine and Rehabilitation. 2004. Vol. 85, iss. 7. P. 1112–1116. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2003.11.027>
 15. Corley G. J., Breen P. P., Bîrlea S. I., Serrador J. M., Grace P. A., Ólaighin G. Hemodynamic effects of habituation to a week-long program of neuromuscular electrical stimulation // Med. Eng. Phys. 2012. Vol. 34, iss. 4. P. 459–465. <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2011.08.005>
 16. Luck J. C., Kunselman R., Cheryl A. D. Blaha Ch. A., 1, Sinoway L. I., Cui J. Multiple laser Doppler flowmetry probes increase the reproducibility of skin blood flow measurements // Frontiers in Physiology. Section: Integrative Physiology. 2022. Vol. 13. Art. 876633. <https://doi.org/10.3389/fphys.2022.876633>
 17. Fredriksson I., Fors C., Johansson J. Laser Doppler Flowmetry – A Theoretical Framework. Linköping : Linköping University, 2012. 22 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/238678169_Laser_Doppler_Flowmetry_-_A_Theoretical_Framework (дата обращения: 06.07.2025).
 18. Крупинкин А. И., Сидоров В. В. Функциональная диагностика состояния микроциркуляторно-тканевых систем: колебания, информация, нелинейность. Руководство для врачей. М. : Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2013. 496 с.
 19. Stefanovska A., Bračić M., Kvernmo H. D. Wavelet analysis of oscillations in the peripheral blood circulation measured by laser Doppler technique // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. 1999. Vol. 46, № 10. P. 1230–1239. <https://doi.org/10.1109/10.790500>
 20. Куликов Д. А., Глазков А. А., Ковалева Ю. А., Балашова Н. В., Куликов А. В. Перспективы использования лазерной допплеровской флуориметрии в оценке кожной микроциркуляции крови при сахарном диабете // Сахарный диабет. 2017. Т. 20, № 4. С. 279–285. <https://doi.org/10.14341/DM8014>
 21. Скрипаль Ан. В., Аль-Бадри Фаркад, Машков К. В., Усанов А. Д., Аверьянов А. П. Лазерная флуориметрия 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>
 22. Сидоров В. В., Рыбаков Ю. Л., Гукасов В. М., Евтушенко Г. С. Система локальных анализаторов для неинвазивной диагностики общего состояния компартментов микроциркуляторно-тканевой системы кожи человека // Медицинская техника. 2021. № 6 (330). С. 4–6. EDN: PENVNR
 23. Козлов В. И., Азизов Г. А., Гурова О. А., Литвин Ф. Б. Лазерная допплеровская флуориметрия

- в оценке состояния и расстройств микроциркуляции крови. М. : Российский университет дружбы народов, 2012. 32 с. URL: <http://angiologia.ru/specialist/cathedra/recommendations/2012/001.pdf> (дата обращения: 07.07.2025).
24. Патент SU 2731802 C1 (РФ). МПК A61N 1/32 (2006/01). Способ электростимуляции мочеточника : заявл. 2019.11.15 : опубл. 2020.09.08 / Рытик А. П., Вербицкий С. М., Кутикова О. Ю. ; патентообладатель : Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского. URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2731802C1_20200908 (дата обращения: 07.07.2025).
 25. Прозова Е. Е., Рытик А. П., Горемыкин В. И., Усанов Д. А., Григорьева М. М. Устройство для коррекции нарушений уродинамики верхних мочевых путей у детей с хроническим пиелонефритом // Медицинская техника. 2014. № 4 (286). С. 1–4. EDN: SYMXWP

References

1. *Cardiovascular diseases.* Available at: [https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-\(cvds\)](https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-(cvds)) (accessed February 12, 2025) (in Russian).
2. Glushchenko V. A., Irklienko E. K. Cardiovascular morbidity is one of the most important health problems. *Medicine and Health Care Organization*, 2019, vol. 4, no. 1, pp. 56–63 (in Russian). EDN: KNGYDV
3. Kosolapov V. P., Yarmonova M. V. Analysis of high cardiovascular morbidity and mortality in the adult population as a medical and social problem and the search for ways to solve it. *Ural Medical Journal*, 2021, vol. 20, no. 1, pp. 58–64 (in Russian). <https://doi.org/10.52420/2071-5943-2021-20-1-58-64>
4. Currie J., Ramsbott R., Ludlow H., Nevill A., Gilder M. Cardio-respiratory fitness, habitual physical activity and serum brain derived neurotrophic factor (BDNF) in men and women. *Neurosci.*, 2009, vol. 451, iss. 2, pp. 152–155. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2008.12.043>
5. Dobsák P., Nováková M., Siegelová J., Fiser B., Vítovc J., N. Nagasaka, Kohzuki M., Yambe T., Nitta Shin-ichi, Eicher J.-Ch., Wolf J.-E., Imachi K. Low-frequency electrical stimulation increases muscle strength and improves blood supply in patients with chronic heart failure. *Circ. J.*, 2006, vol. 70, iss. 1, pp. 75–82. <https://doi.org/10.1253/circj/70.75>
6. Hamada T., Hayashi T., Kimura T., Nakao K., Moritani T. Electrical stimulation of human lower extremities enhances energy consumption, carbohydrate oxidation, and whole body glucose uptake. *J. Appl. Physiol.*, 2004, vol. 96, iss. 3, pp. 911–916. <https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00664.2003>
7. Hamada T., Sasaki H., Hayashi T., Moritani T., Nakao K. Enhancement of whole body glucose uptake during and after human skeletal muscle low-frequency electrical stimulation. *J. Appl. Physiol.*, 2003, vol. 94, iss. 6, pp. 2107–2112. <https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00486.2002>
8. Hasegawa S., Kobayashi M., Arai R., Tamaki A., Nakamura T., Moritani T. Effect of early implementation of electrical muscle stimulation to prevent muscle atrophy and weakness in patients after anterior cruciate ligament reconstruction. *J. Electromyogr. Kinesiol.*, 2011, vol. 21, iss. 4, pp. 622–630. <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2011.01.005>
9. Megumi Hoshiai, Kaori Ochiai, Yuma Tamura. Effects of whole body neuromuscular electrical stimulation device on hemodynamics, arrhythmia, and sublingual microcirculation. *Heart and Vessels*, 2021, vol. 36, pp. 844–852. <https://doi.org/10.1007/s00380-020-01755-1>
10. Ando S., Takagi Y., Watanabe H., Mochizuki K., Sudo M., Fujibayashi M., Tsurugano Sh., Kohei Sato K. Effects of electrical muscle stimulation on cerebral blood flow. *BMC Neurosci.*, 2021, vol. 22, art. 67. <https://doi.org/10.1186/s12868-021-00670-z>
11. Hardy E. J., Hatt J., Doleman B., Smart T. F., Piasceki M., Lund J. N., Phillips B. E. Post-operative electrical muscle stimulation attenuates loss of muscle mass and function following major abdominal surgery in older adults: a split body randomised control trial. *Age and Ageing*, 2022, vol. 51, iss. 10, art. afac234. <https://doi.org/10.1093/ageing/afac234>
12. Mukherjee S., Fok J. R., van Mechelen W. Electrical Stimulation and Muscle Strength Gains in Healthy Adults: A Systematic Review. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 2023, vol. 37, no. 4, pp. 938–950. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000004359>
13. Filipovic A., Kleinöder H., Dörmann U., Mester J. Electromyostimulation—A Systematic Review of the Influence of Training Regimens and Stimulation Parameters on Effectiveness in Electromyostimulation Training of Selected Strength Parameters. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 2011, vol. 25, no. 11, pp. 3218–3238. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e318212e3ce>
14. Wang J.-S., Chen S.-Y., Lan C., Wong M.-K., Lai J.-S. Neuromuscular electric stimulation enhances endothelial vascular control and hemodynamic function in paretic upper extremities of patients with stroke. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 2004, vol. 85, iss. 7, pp. 1112–1116. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2003.11.027>
15. Corley G. J., Breen P. P., Bîrlea S. I., Serrador J. M., Grace P. A., Ólaighin G. Hemodynamic effects of habituation to a week-long program of neuromuscular electrical stimulation. *Med. Eng. Phys.*, 2012, vol. 34, iss. 4, pp. 459–465. <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2011.08.005>
16. Luck J. C., Kunselman R., Cheryl A. D., Blaha Ch. A., Sinoway L. I., Cui J. Multiple laser Doppler flowmetry probes increase the reproducibility of skin blood flow measurements. *Frontiers in Physiology. Section: Integrative Physiology*, 2022, vol. 13, art. 876633. <https://doi.org/10.3389/fphys.2022.876633>
17. Fredriksson I., Fors C., Johansson J. *Laser Doppler Flowmetry – A Theoretical Framework*. Linköping, Linköping University, 2012. 22 p. Available at:



- https://www.researchgate.net/publication/238678169_Laser_Doppler_Flowmetry_-_A_Theoretical_Framework (accesed July 06, 2025).
18. Krupatkin A. I., Sidorov V. V. *Funktional'naya diagnostika sostoyaniya mikrotsirkulyatorno-tkanevykh sistem: kolebaniya, informatsiya, nelineynost'*. Rukovodstvo dlya vrachey [Functional diagnostics of the state of microcirculatory-tissue systems: Oscillations, information, nonlinearity. Manual for doctors]. Moscow, Knizhnyy dom "LIBROKOM", 2022. 496 p. (in Russian).
19. Stefanovska A., Bračić M., Kvernmo H. D. Wavelet analysis of oscillations in the peripheral blood circulation measured by laser Doppler technique. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 1999, vol. 46, no. 10, pp. 1230–1239. <https://doi.org/10.1109/10.790500>
20. Kulikov D. A., Glazkov A. A., Kovaleva Yu. A., Balashova N. V., Kulikov A. V. Prospects of laser Doppler flowmetry application in assessment of skin microcirculation in diabetes. *Diabetes Mellitus*, 2017, vol. 20, no. 4, pp. 279–285. <https://doi.org/10.14341/DM8014>
21. Skripal An.V., Al-Badri Farkad, Mashkov K. V., Usanov AD, Averyanov A. P. Laser flowmetry of finger blood microcirculation depending on external temperature and limb position. *Regional Blood Circulation and Micro-circulation*, 2023, vol. 22, no. 4, pp. 35–41 (in Russian). <https://doi.org/10.24884/1682-6655-2023-22-4-35-41>
22. Sidorov V. V., Rybakov Yu. L., Gukasov V. M., Yevtushenko G. S. A device for comprehensive non-invasive diagnostics of the tissue microcirculation system of human skin. *Biomedical Engineering*, 2021, vol. 55, no. 4, pp. 232–235. <https://doi.org/10.1007/s10527-021-10108-9>
23. Kozlov V. I., Azizov G. A., Gurova O. A., Litvin F. B. *Laser Doppler flowmetry in assessing the state and disorders of blood microcirculation*. Moscow, RUDN University Publ., 2012, 32 p. Available at: <http://angiologia.ru/specialist/cathedra/recommendations/2012/001.pdf> (accessed July 7, 2025) (in Russian).
24. Method of electrical stimulation of the ureter. RF Patent No. 2731802. IPC A61N 1/32 C1 (РФ). МПК A614N 1/32 (2006/01). Declared November 15, 2019, published September 08, 2020. Rytik A. P., Verbitskii S. M., Kutikova O. Yu. Available at: https://yandex.ru/patents/doc/RU2731802C1_20200908 (accessed July 7, 2025).
25. Goremykin V. I., Prosova E. E., Usanov D. A., Rytik A. P., Grigorieva M. M. Device for the correction of urodynamics disorders of the upper urinary tract in children with chronic pyelonephritis. *Biomedical Engineering*, 2014, vol. 48, no. 4, pp. 169–172. <https://doi.org/10.1007/s10527-014-9445-y>

Поступила в редакцию 16.04.2025; одобрена после рецензирования 17.06.2025;
принята к публикации 10.07.2025; опубликована 29.08.2025

The article was submitted 16.04.2025; approved after reviewing 17.06.2025;
accepted for publication 10.07.2025; published 29.08.2025