

doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-1-14-20

УДК 535.8

Исследование реакции кровеносных сосудов на локальный нагрев методом визуализирующей фотоплетизмографии

Анжелика Вадимовна Белавенцева¹✉, Наталья Петровна Подолян²,
Максим Александрович Волинский³, Валерий Викторович Зайцев⁴,
Анастасия Владимировна Саковская⁵, Олег Викторович Мамонтов⁶,
Роман Владимирович Ромашко⁷, Алексей Александрович Камшилин⁸

^{1,2,3,4,5,6,7,8} Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, 690041, Российская Федерация

³ Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

^{4,6} Национальный медицинский исследовательский центр им. В.А. Алмазова Минздрава России, Санкт-Петербург, 197341, Российская Федерация

⁵ Тихоокеанский государственный медицинский университет, Владивосток, 690002, Российская Федерация

⁶ Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет имени Павлова, Санкт-Петербург, 197022, Российская Федерация

¹ ange202@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-8218-6766>

² podolian@iacp.dvo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2108-4376>

³ maxim.volynsky@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1679-4450>

⁴ zaytsevphoto@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3366-8376>

⁵ sakovska86@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4077-9739>

⁶ mamontoffoleg@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3063-439X>

⁷ romashko@dvo.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0869-0993>

⁸ alexei.kamshilin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2506-9736>

Аннотация

Предмет исследования. Исследована возможность применения нового бесконтактного метода визуализирующей фотоплетизмографии для исследования терморегуляторной вазодилатации сосудов. **Метод.** Реакция перфузии в области внешнего предплечья в ответ на локальный нагрев до 41 ± 1 °C была оценена у шести добровольцев в возрасте 39–52 лет с помощью видеозаписи исследуемой области, синхронизированной с электрокардиограммой, и последующей корреляционной обработкой полученных данных. **Основные результаты.** Показано, что изменение перфузии при локальном нагреве носит двухфазный характер и обусловлено откликом нервной системы, опосредованным аксон-рефлексом в первой фазе вазодилатации, и синтезом оксида азота в клетках эндотелия во второй фазе. Установлено, что многократный рост перфузии в первой фазе нагрева зависит как от начальной температуры кожи, так и от разницы температуры ее нагрева. Обнаружено, что для существенного развития сосудистой реакции на гипертермию, связанную с активацией эндотелиальной функции, необходим нагрев тканей длительностью более 15 мин. **Практическая значимость.** Подтверждено, что метод визуализирующей фотоплетизмографии достоверно отражает работу механизмов регуляции периферического сосудистого сопротивления, что имеет большое прогностическое значение для выявления первичных признаков сердечно-сосудистых заболеваний.

Ключевые слова

визуализирующая фотоплетизмография, микроциркуляция, реактивность сосудов, перфузия, терморегуляция

Благодарности

Исследование реализовано при поддержке гранта № 21-15-00265 Российского научного фонда в части разработки измерительной системы, включая программное обеспечение, и проведения экспериментов. Обработка и хранение экспериментальных данных осуществлялись с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Дальневосточный вычислительный ресурс» Института автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук.

© Белавенцева А.В., Подолян Н.П., Волинский М.А., Зайцев В.В., Саковская А.В., Мамонтов О.В., Ромашко Р.В., Камшилин А.А., 2023

Ссылка для цитирования: Белавенцева А.В., Подолян Н.П., Волынский М.А., Зайцев В.В., Саковская А.В., Мамонтов О.В., Ромашко Р.В., Камшилин А.А. Исследование реакции кровеносных сосудов на локальный нагрев методом визуализирующей фотоплетизмографии // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23, № 1. С. 14–20. doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-1-14-20

Study of blood vessels reaction to local heating by imaging photoplethysmography

Anzhelika V. Belaventseva^{1✉}, Natalia P. Podolyan², Maxim A. Volynsky³,
Valery V. Zaytsev⁴, Anastasiia V. Sakovskaia⁵, Oleg V. Mamontov⁶,
Roman V. Romashko⁷, Alexei A. Kamshilin⁸

^{1,2,3,4,5,6,7,8} Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, 690041, Russian Federation

³ ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

^{4,6} Almazov National Medical Research Centre, Saint Petersburg, 197341, Russian Federation

⁵ Pacific State Medical University, Vladivostok, 690002, Russian Federation

⁶ Pavlov First Saint Petersburg State Medical University, Saint Petersburg, 197022, Russian Federation

¹ ange202@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-8218-6766>

² podolian@iacp.dvo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2108-4376>

³ maxim.volynsky@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1679-4450>

⁴ zaytsevphoto@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3366-8376>

⁵ sakovska86@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4077-9739>

⁶ mamontoffoleg@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3063-439X>

⁷ romashko@dvo.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0869-0993>

⁸ alexei.kamshilin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2506-9736>

Abstract

The possibility of using a new contactless method of imaging photoplethysmography to assess thermoregulatory vasodilatation of blood vessels was studied. Perfusion reaction in a region of the outer forearm in response to local heating up to 41 ± 1 °C was monitored in six volunteers aged 39–52 years using a video recording of the study area, synchronized with an electrocardiogram, and subsequent correlation processing of the data obtained. It was shown that the change in perfusion during local heating has a biphasic type and is due to the response of the nervous system mediated by the axon reflex in the first phase of vasodilation and the synthesis of nitric oxide in endothelial cells in the second phase of vasodilation. It was revealed that the multiple increase in perfusion in the first phase of heating depends both on the initial temperature of the skin and on the difference in its heating temperature. It was found that for a significant development of a vascular response to hyperthermia associated with the activation of endothelial function, heating of tissues for more than 15 minutes is necessary. It was shown that the method of imaging photoplethysmography reliably reflects the work of the mechanisms of regulation of peripheral vascular resistance which is of great prognostic value for the detection of primary signs of cardiovascular diseases.

Keywords

imaging photoplethysmography, microcirculation, vascular reactivity, blood perfusion, thermoregulation

Acknowledgements

The research was supported by the Russian Science Foundation (Grant 21-15-00265) in terms of the development of a measuring system, including software, and carrying out experiments. Processing and storage of experimental data were carried out using the equipment of Shared Resource Center “Far Eastern Computing Resource” of the Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences.

For citation: Belaventseva A.V., Podolyan N.P., Volynsky M.A., Zaytsev V.V., Sakovskaia A.V., Mamontov O.V., Romashko R.V., Kamshilin A.A. Study of blood vessels reaction to local heating by imaging photoplethysmography. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2023, vol. 23, no. 1, pp. 14–20 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-1-14-20

Введение

Микроциркуляторная система — часть системы кровообращения, которая обеспечивает ткани питательными веществами, удаление из них продуктов метаболизма и доставку кислорода. Работу системы микроциркуляции обеспечивает целый ряд функциональных процессов, регулируемых гормональной и вегетативной нервными системами. Эндотелий представляет собой важный эндокринный орган, играющий огромную роль в регуляции тонуса в микроциркуляторном русле и в поддержании сосудистого гомеостаза. Среди эндогенных регуляторов сердечно-сосудистой

системы, синтезируемых в клетках эндотелия, различают вазодилататоры (простациклин, эндотелиальные гиперполяризующие факторы и оксид азота (NO)), и вазоконстрикторы [1]. Эндотелиальная дисфункция, обусловленная дисбалансом секретируемых эндотелием NO и других биологически активных веществ, предшествует развитию любых патологических изменений в сосудах и носит системный характер. Так, эндотелиальной дисфункции способствует артериальная гипертензия [2, 3], курение [4], сахарный диабет [5, 6], нарушение толерантности к глюкозе, ожирение и дислипидемия [7]. Таким образом, оценка вазодилатационных свойств, связанных с содержанием NO, может

предоставить информацию о целостности и функции эндотелия и имеет важное прогностическое значение при выявлении первичных сердечно-сосудистых патологий.

Участие кожной микроциркуляции в терморегуляции человека характеризуется чрезвычайной лабильностью кровотока в ответ на температурные воздействия [8]. Локальный нагрев кожи вызывает локальную гиперемию, характеризующуюся двухфазным усилением кожного кровотока. Быстрый начальный пик наблюдается в течение 2–5 мин после начала нагревания и обуславливается аксон-рефлексом местного чувствительного нерва [8, 9]. В работе [10] показано, что в аксон-рефлекс вносит важный вклад катион-селективный ионный канал ваниллоидного типа 1 (TRPV-1), преимущественно локализованный на чувствительных нервах. За первоначальным пиком следует короткий спад, а затем продолжительное плато в течение 20–30 минутного нагревания. Позднее плато зависит преимущественно от эндотелиальных факторов, среди которых на NO приходится примерно две трети вклада [11]. Подтверждение роли эндотелия получено в работе [12], где обнаружено, что эндотелиальный ингибитор NG-амино-1-аргинин (NOS) не оказывает существенного влияния на рефлекторный сосудорасширяющий ответ, но снижает более чем на 50 % прирост кожного кровотока при местном нагреве. Эти данные убедительно показывают важную роль NOS для кожной вазодилаторной реакции в ответ на локальное нагревание кожи. Очевидно, что тепловая гиперемия кожи может быть использована для определения признаков глобальной микрососудистой дисфункции.

На сегодняшний день для оценки нарушений микроциркуляции крови при различных сердечно-сосудистых патологиях широко применяется метод тепловых проб [9]. Большинство особенностей реакции микроциркуляции на локальное нагревание кожи получены с помощью метода лазерной доплеровской флуометрии (ЛДФ) [13, 14]. Среди недостатков данного метода выделяют низкую воспроизводимость и чувствительность результатов к условиям проведения исследования. Кроме того, датчик ЛДФ оценивает параметры кровотока в одной точке контакта с кожей, а механизм сканирования, необходимый для визуализации, ограничивает скорость исследования и усложняет систему. Заметим, что, несмотря на почти полувековую историю использования метода ЛДФ в исследовании микроциркуляции, он до сих пор не применяется в клинической практике.

В последнее время все чаще используется метод визуализирующей фотоплетизмографии (ВФПГ) для оценки перфузии тканей *in vivo*, позволяя количественно оценить пространственное распределение параметров кровотока [15, 16]. В настоящей работе для оценки изменений перфузии ткани кровью, обусловленных термическим воздействием на биологическую ткань, использован метод ВФПГ, который дает возможность бесконтактного исследования большой площади ткани, что значительно повышает достоверность полученных результатов [17].

Метод визуализирующей фотоплетизмографии

Схема измерительной системы, основанная на методе ВФПГ, представлена на рис. 1. На внешнюю область предплечья наложена стеклянная пластина размером $70 \times 20 \times 2$ мм с прозрачным токопроводящим слоем, обеспечивающим локальный нагрев исследуемого участка. Исследуемая область равномерно освещена зелеными светодиодами (длина волны $\lambda = 530 \pm 25$ нм, выходная мощность $P = 7,5$ Вт), а набор изображений в отраженном свете зарегистрирован видеокамерой. Давление, оказываемое нагревательным элементом на кожу, измерено для каждого испытуемого. Во всех случаях оно не превышает 15 мм рт. ст., что не препятствует нормальному кровотоку в области измерения, и обеспечивает стабильную теплопроводность для передачи тепла от нагревателя.

Известно [18], что именно зеленый свет после взаимодействия с биологической тканью, содержащей кровеносные сосуды, приобретает наибольшую модуляцию на частоте сердцебиений, несмотря на то, что глубина его проникновения в кожу не превышает 0,5 мм. В рамках альтернативной модели формирования фотоплетизмографического сигнала модуляция обусловлена механическим изменением плотности капилляров в дерме вследствие пульсаций близлежащих артерий и артериол [19]. Таким образом, капиллярное русло оказывается распределенным преобразователем пульсаций глуболежащих артерий в модуляцию света на частоте сердцебиений. Так как амплитуда артериальных пульсаций определяет перфузию в исследуемой области (чем больше амплитуда пульсаций, тем выше перфузия),

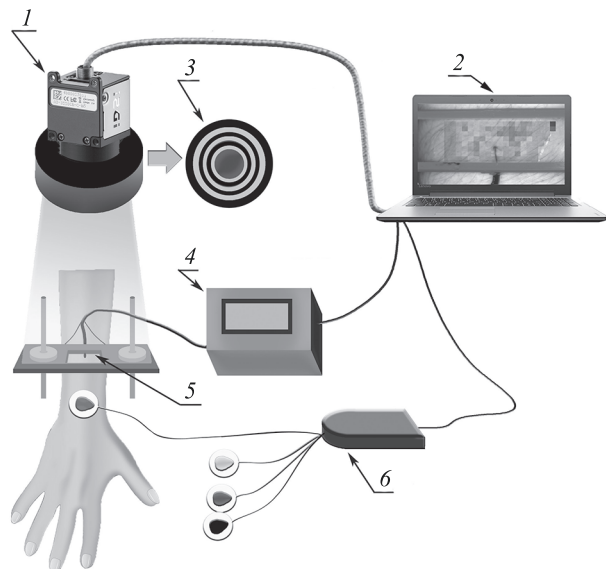


Рис. 1. Схема измерительной системы: 1 — цифровая видеокамера; 2 — персональный компьютер; 3 — светодиодный осветитель; 4 — блок контроля температуры; 5 — нагревательное устройство; 6 — электрокардиограф

Fig. 1. Schematic of the measuring system: 1 — digital video camera; 2 — computer; 3 — light-emitting diode illuminator; 4 — heating control unit; 5 — heating element; 6 — electrocardiograph

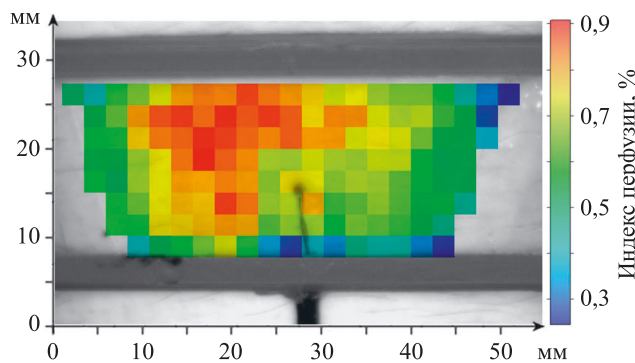


Рис. 2. Пример пространственного распределения индекса перфузии в области локального нагрева на 500 с после нагрева

Fig. 2. An example of spatial distribution of the perfusion index in the area of local heating at 500th s after the heating

то амплитуда модуляции света на частоте сердцебиений характеризует локальную перфузию исследуемого участка [20]. Соответственно, пространственные распределения амплитуды модуляции изображения на частоте сердцебиений отражают распределение перфузии (рис. 2).

Для регистрации отраженного света использована монохромная 10-разрядная видеокамера UI-3060CP-M-GL (Imaging Development Systems GmbH, Оберзульм, Германия) с объективом M1214-MP2 (Computar, Токио, Япония, $F = 12$ мм, угол обзора $89^\circ \times 67^\circ$). Камера закреплена в одном корпусе с осветителем, состоящем из 250 светодиодов, расположенных концентрическими кольцами вокруг линзы объектива (диаметр наибольшего кольца 9,8 см), что обеспечивает равномерное освещение области исследования на расстоянии около 30 см. Видеозапись осуществляется синхронно с записью электрокардиограммы (электрокардиограф «Кардиотехника-ЭКГ-8», производства «ИНКАРТ», Санкт-Петербург, Россия) для последующего получения надежного сигнала фотоплетизмографии. Видеокадры со сфокусированными изображениями освещенного участка кожи записаны с частотой 36 кадров в секунду на персональный компьютер через универсальную последовательную шину (USB) и обработаны с помощью специального программного обеспечения, реализованного на платформе MATLAB. Регистрируемый сигнал каждого пикселя изображения состоит из переменной составляющей (AC), модулированной на частоте сердцебиений, и медленно меняющейся (DC), которая относится к низкочастотным модуляциям, обусловленным процессами дыхания и работой нервной системы [21]. Для построения карт распределения перфузии использовано отношение AC/DC, которое уменьшает влияние неоднородности освещения и рельефа кожи на вычисляемый индекс перфузии [20]. Для уменьшения влияния бликов от верхнего слоя эпидермиса и поверхности стекла нагревательного элемента применен метод поляризационной фильтрации, реализованный посредством установки тонкопленочных поляризаторов с взаимно ортогональной ориентацией после излучателя и перед камерой.

В процессе обработки изображений для получения достоверного сигнала пульсовой волны в каждом пикселе начало каждого импульса нормализованного сигнала AC/DC было совмещено с соответствующим R-пиком электрокардиограммы. Затем пульсовые волны в 15 последовательных кардиоциклах усреднялись для вычисления индекса перфузии в каждом пикселе [18, 20]. Проведена оценка индекса перфузии на половине площади контакта, характеризующейся более высокой реакцией на нагревание. Расчет индекса перфузии выполнен как разность максимального и минимального значений усредненной формы импульса отношения AC/DC.

Локальная гипертермия кожных покровов до температуры $41 \pm 1^\circ\text{C}$ осуществлена с помощью прозрачной токопроводящей пластины и проконтролирована на персональном компьютере. Отметим, что токопроводящий слой не контактировал с кожей, а вазелин, нанесенный между стеклянной пластиной и кожей, обеспечил теплопроводность. Регистрация и контроль температуры осуществлены посредством термодатчика, расположенной между пластиной и кожей, синхронно с записываемыми видеокадрами.

Протокол исследования

Все измерения проведены в затемненной лаборатории в отсутствие посторонних источников излучения при температуре окружающей среды 23°C . В исследовании приняло участие 6 здоровых добровольцев мужского пола в возрасте 39–52 лет.

Перфузионная реакция на локальный нагрев оценена в три этапа. На первом этапе выполнена непрерывная видеозапись исследуемого участка синхронно с измерением сигнала ЭКГ и температуры кожи в течение 5 мин. На втором — осуществлен нагрев области предплечья до $41 \pm 1^\circ\text{C}$ со скоростью около $3,5^\circ\text{C}$ в минуту, чтобы избежать болезненных ощущений. Достигнутый уровень температуры кожи поддерживается в течение нескольких минут. Для каждого из добровольцев проведено по три исследования с различными длительностями нагрева в 7, 15 и 20 мин. На последнем этапе нагреватель выключался, и температура кожи релаксировала естественным образом. Проведено не более одного исследования каждого испытуемого в день. Исследования выполнены с разрешения междисциплинарного комитета по этике Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тихоокеанский государственный медицинский университет» Минздрава России, протокол №10 от 21.06.2021.

Результаты

С помощью системы ВФПГ у всех испытуемых было выявлено многократное увеличение амплитуды пульсаций кожного кровотока после локального нагрева наружной части предплечья. Изменение индекса перфузии носит двухфазный характер. Во время фазы 1 вазодилатации (после включения нагревательной пластины) происходит быстрый рост перфузии, обусловленный

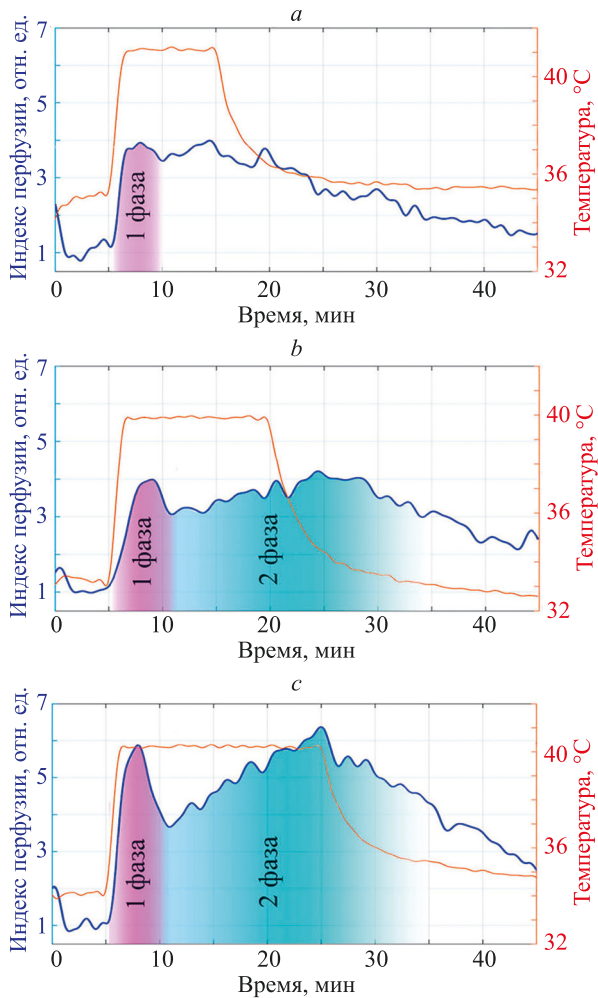


Рис. 3. Отклик перфузии на локальный нагрев при различной его длительности: 7 мин (a); 15 мин (b); 20 мин (c)

Fig. 3. The perfusion response to local heating at different durations — 7 minutes (a), 15 minutes (b), and 20 minutes (c)

аксон-рефлексом (рис. 3). Установлено, что величина перфузионного отклика на гипертермию в фазе 1 вазодилатации зависит от начальной температуры кожного покрова и разницы температур его нагрева. Проведенный корреляционный анализ (тест Пирсона) показал достоверную положительную корреляцию роста перфузии с разницей температур (коэффициент корреляции $r = 0,92$, уровень значимости $p < 0,001$) и отрицательную с начальной температурой ($r = -0,90$, $p < 0,001$).

Фаза 2 вазодилатации развивается при продолжительном нагреве, при котором, вслед за падением пер-

фузии и появлением локального минимума на кривой, происходит усиление интенсивности кровотока, что приводит к росту перфузии и появлению второго максимума (рис. 3, b, c). Такой рост перфузии связан с синтезом NO [11, 14]. Так, с увеличением продолжительности гиперемии, увеличивается перфузия в фазе 2, что выражается в статистически значимом увеличении интегрального отклика перфузии в группе с 15-минутным нагревом по сравнению с группой с 7-минутным нагревом, $p = 0,028$ (тест Уилкоксона), в то время как в перфузионных реакциях фазы 1 различий между группами не обнаружено. Таким образом, для существенного развития сосудистой реакции на гипертермию, опосредованную синтезом NO, необходим нагрев тканей длительностью более 15 мин. После отключения нагревательной пластины происходит снижение перфузии до ее первоначального значения.

Выводы

Выполненное исследование продемонстрировало возможность оценки реакции кровеносных сосудов на локальный нагрев методом визуализирующей фотоплетизмографии. Представленные зависимости отклика перфузии от локальной гипертермии являются характерными и согласуются с результатами, полученными при исследованиях вазодилатации с помощью ЛДФ [14]. Предложенный метод ВФПГ позволяет осуществлять мониторинг сосудистой реакции в значительной части области исследования в ответ на дозированную локальную гипертермию, чем принципиально отличается от других оптических методов диагностики. Стабильность локального нагрева кожи достигнута с использованием новой мультимодальной системы, в которой нагревательное стекло контактирует с кожей, в то время как перфузия оценена бесконтактным способом с помощью визуализирующей фотоплетизмографии.

Заключение

Таким образом, метод визуализирующей фотоплетизмографии достоверно отражает регуляцию сосудистого тонуса, что позволит в дальнейшем изучать роль дисфункции эндотелия в патогенезе сердечно-сосудистых патологии и исследовать различные физиологические нарушения, вызванные ей. Предлагаемая система обладает рядом преимуществ по сравнению с доступными методами оценки микроциркуляции: отличается низкой стоимостью, высокой информативностью и воспроизводимостью результатов.

Литература

1. Gimbrone M., Garcia-Cardena G. Endothelial cell dysfunction and the pathobiology of atherosclerosis // *Circulation Research*. 2016. V. 118. N 4. P. 620–636. <https://doi.org/10.1161/circresaha.115.306301>
2. Widlansky M.E., Gokce N., Keaney J.F., Vita J.A. The clinical implications of endothelial dysfunction // *Journal of the American College of Cardiology*. 2003. V. 42. N 7. P. 1149–1160. [https://doi.org/10.1016/s0735-1097\(03\)00994-x](https://doi.org/10.1016/s0735-1097(03)00994-x)

References

1. Gimbrone M., Garcia-Cardena G. Endothelial cell dysfunction and the pathobiology of atherosclerosis. *Circulation Research*, 2016, vol. 118, no. 4, pp. 620–636. <https://doi.org/10.1161/circresaha.115.306301>
2. Widlansky M.E., Gokce N., Keaney J.F., Vita J.A. The clinical implications of endothelial dysfunction. *Journal of the American College of Cardiology*, 2003, vol. 42, no. 7, pp. 1149–1160. [https://doi.org/10.1016/s0735-1097\(03\)00994-x](https://doi.org/10.1016/s0735-1097(03)00994-x)

3. Dharmashankar K., Widlansky M.E. Vascular endothelial function and hypertension: insights and directions // *Current Hypertension Reports*. 2010. V. 12. N 6. P. 448–455. <https://doi.org/10.1007/s11906-010-0150-2>
4. Celermajer D.S., Sorensen K.E., Georgakopoulos D., Bull C., Thomas O., Robinson J., Deanfield J.E. Cigarette smoking is associated with dose-related and potentially reversible impairment of endothelium-dependent dilation in healthy young adults // *Circulation*. 1993. V. 88. N 5. P. 2149–2155. <https://doi.org/10.1161/01.cir.88.5.2149>
5. Mäkimattila S., Virkamäki A., Groop P.-H., Cockcroft J., Utriainen T., Fagerudd J., Yki-Järvinen H. Chronic hyperglycemia impairs endothelial function and insulin sensitivity via different mechanisms in insulin-dependent diabetes mellitus // *Circulation*. 1996. V. 94. N 6. P. 1276–1282. <https://doi.org/10.1161/01.cir.94.6.1276>
6. Williams S.B., Cusco J.A., Roddy M.A., Johnstone M.T., Creager M.A. Impaired nitric oxide-mediated vasodilation in patients with non-insulin-dependent diabetes mellitus // *Journal of the American College of Cardiology*. 1996. V. 27. N 3. P. 567–574. [https://doi.org/10.1016/0735-1097\(95\)00522-6](https://doi.org/10.1016/0735-1097(95)00522-6)
7. Spieker L.E., Sudano I., Hürliemann D., Lerch P.G., Lang M.G., Binggeli C., Corti R., Ruschitzka F., Lüscher T.F., Noll G. High-density lipoprotein restores endothelial function in hypercholesterolemic men // *Circulation*. 2002. V. 105. N 12. P. 1399–1402. <https://doi.org/10.1161/01.cir.0000013424.28206.8f>
8. Minson C.T. Thermal provocation to evaluate microvascular reactivity in human skin // *Journal of Applied Physiology*. 2010. V. 109. N 9. P. 1239–1246. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00414.2010>
9. Minson C.T., Berry L.T., Joyner M.J. Nitric oxide and neurally mediated regulation of skin blood flow during local heating // *Journal of Applied Physiology*. 2001. V. 91. N 4. P. 1619–1626. <https://doi.org/10.1152/jappl.2001.91.4.1619>
10. Wong B.J., Fieger S.M. Transient receptor potential vanilloid type-1 (TRPV-1) channels contribute to cutaneous thermal hyperaemia in humans // *The Journal of Physiology*. 2010. V. 588. N 21. P. 4317–4326. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2010.195511>
11. Brunt V.E., Minson C.T. Cutaneous thermal hyperemia: more than skin deep // *Journal of Applied Physiology*. 2011. V. 111. N 1. P. 5–7. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00544.2011>
12. Kellogg D.L., Zhao J.L., Wu Y. Endothelial nitric oxide synthase control mechanisms in the cutaneous vasculature of humans in vivo // *American Journal of Physiology — Heart and Circulatory Physiology*. 2008. V. 295. N 1. P. H123–H129. <https://doi.org/10.1152/ajpheart.00082.2008>
13. Debbabi H., Bonnin Ph., Ducluzeau P.H., Leftheriotis G., Levy B.I. Noninvasive assessment of endothelial function in the skin microcirculation // *American Journal of Hypertension*. 2010. V. 23. N 5. P. 541–546. <https://doi.org/10.1038/ajh.2010.10>
14. Cracowski J.-L., Minson C.T., Salvat-Melis M., Halliwill J. Methodological issues in the assessment of skin microvascular endothelial function in humans // *Trends in Pharmacological Sciences*. 2006. V. 27. N 9. P. 503–508. <https://doi.org/10.1016/j.tips.2006.07.008>
15. Mamontov O.V., Shcherbinin A.V., Romashko R.V., Kamshilin A.A. Intraoperative imaging of cortical blood flow by camera-based photoplethysmography at green light // *Applied Sciences*. 2020. V. 10. N 18. P. 6192. <https://doi.org/10.3390/app10186192>
16. Kukul I., Trumpp A., Plötze K., Rost A., Zaunseder S., Matschke K., Rasche S. Contact-free optical assessment of changes in the chest wall perfusion after coronary artery bypass grafting by imaging photoplethysmography // *Applied Sciences*. 2020. V. 10. N 18. P. 6537. <https://doi.org/10.3390/app10186537>
17. Volynsky M.A., Margaryants N.B., Mamontov O.V., Kamshilin A.A. Contactless monitoring of microcirculation reaction on local temperature changes // *Applied Sciences*. 2019. V. 9. N 22. P. 4947. <https://doi.org/10.3390/app9224947>
18. Cui W.J., Ostrander L.E., Lee B.Y. In vivo reflectance of blood and tissue as a function of light wavelength // *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. 1990. V. 37. N 6. P. 632–639. <https://doi.org/10.1109/10.55667>
19. Kamshilin A.A., Nippolainen E., Sidorov I.S., Vasilev P.V., Erofeev N.P., Podolian N.P., Romashko R.V. A new look at the essence of the imaging photoplethysmography // *Scientific Reports*. 2015. V. 5. N 1. P. 10494. <https://doi.org/10.1038/srep10494>
20. Lyubashina O.A., Mamontov O., Volynsky M., Zaytsev V.V., Kamshilin A.A. Contactless assessment of cerebral autoregulation by
3. Dharmashankar K., Widlansky M.E. Vascular endothelial function and hypertension: insights and directions. *Current Hypertension Reports*, 2010, vol. 12, no. 6, pp. 448–455. <https://doi.org/10.1007/s11906-010-0150-2>
4. Celermajer D.S., Sorensen K.E., Georgakopoulos D., Bull C., Thomas O., Robinson J., Deanfield J.E. Cigarette smoking is associated with dose-related and potentially reversible impairment of endothelium-dependent dilation in healthy young adults. *Circulation*, 1993, vol. 88, no. 5, pp. 2149–2155. <https://doi.org/10.1161/01.cir.88.5.2149>
5. Mäkimattila S., Virkamäki A., Groop pp.-H., Cockcroft J., Utriainen T., Fagerudd J., Yki-Järvinen H. Chronic hyperglycemia impairs endothelial function and insulin sensitivity via different mechanisms in insulin-dependent diabetes mellitus. *Circulation*, 1996, vol. 94, no. 6, pp. 1276–1282. <https://doi.org/10.1161/01.cir.94.6.1276>
6. Williams S.B., Cusco J.A., Roddy M.A., Johnstone M.T., Creager M.A. Impaired nitric oxide-mediated vasodilation in patients with non-insulin-dependent diabetes mellitus. *Journal of the American College of Cardiology*, 1996, vol. 27, no. 3, pp. 567–574. [https://doi.org/10.1016/0735-1097\(95\)00522-6](https://doi.org/10.1016/0735-1097(95)00522-6)
7. Spieker L.E., Sudano I., Hürliemann D., Lerch pp.G., Lang M.G., Binggeli C., Corti R., Ruschitzka F., Lüscher T.F., Noll G. High-density lipoprotein restores endothelial function in hypercholesterolemic men. *Circulation*, 2002, vol. 105, no. 12, pp. 1399–1402. <https://doi.org/10.1161/01.cir.0000013424.28206.8f>
8. Minson C.T. Thermal provocation to evaluate microvascular reactivity in human skin. *Journal of Applied Physiology*, 2010, vol. 109, no. 9, pp. 1239–1246. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00414.2010>
9. Minson C.T., Berry L.T., Joyner M.J. Nitric oxide and neurally mediated regulation of skin blood flow during local heating. *Journal of Applied Physiology*, 2001, vol. 91, no. 4, pp. 1619–1626. <https://doi.org/10.1152/jappl.2001.91.4.1619>
10. Wong B.J., Fieger S.M. Transient receptor potential vanilloid type-1 (TRPV-1) channels contribute to cutaneous thermal hyperaemia in humans. *The Journal of Physiology*, 2010, vol. 588, no. 21, pp. 4317–4326. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2010.195511>
11. Brunt V.E., Minson C.T. Cutaneous thermal hyperemia: more than skin deep. *Journal of Applied Physiology*, 2011, vol. 111, no. 1, pp. 5–7. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00544.2011>
12. Kellogg D.L., Zhao J.L., Wu Y. Endothelial nitric oxide synthase control mechanisms in the cutaneous vasculature of humans in vivo. *American Journal of Physiology — Heart and Circulatory Physiology*, 2008, vol. 295, no. 1, pp. H123–H129. <https://doi.org/10.1152/ajpheart.00082.2008>
13. Debbabi H., Bonnin Ph., Ducluzeau P.H., Leftheriotis G., Levy B.I. Noninvasive assessment of endothelial function in the skin microcirculation. *American Journal of Hypertension*, 2010, vol. 23, no. 5, pp. 541–546. <https://doi.org/10.1038/ajh.2010.10>
14. Cracowski J.-L., Minson C.T., Salvat-Melis M., Halliwill J. Methodological issues in the assessment of skin microvascular endothelial function in humans. *Trends in Pharmacological Sciences*, 2006, vol. 27, no. 9, pp. 503–508. <https://doi.org/10.1016/j.tips.2006.07.008>
15. Mamontov O.V., Shcherbinin A.V., Romashko R.V., Kamshilin A.A. Intraoperative imaging of cortical blood flow by camera-based photoplethysmography at green light. *Applied Sciences*, 2020, vol. 10, no. 18, pp. 6192. <https://doi.org/10.3390/app10186192>
16. Kukul I., Trumpp A., Plötze K., Rost A., Zaunseder S., Matschke K., Rasche S. Contact-free optical assessment of changes in the chest wall perfusion after coronary artery bypass grafting by imaging photoplethysmography. *Applied Sciences*, 2020, vol. 10, no. 18, pp. 6537. <https://doi.org/10.3390/app10186537>
17. Volynsky M.A., Margaryants N.B., Mamontov O.V., Kamshilin A.A. Contactless monitoring of microcirculation reaction on local temperature changes. *Applied Sciences*, 2019, vol. 9, no. 22, pp. 4947. <https://doi.org/10.3390/app9224947>
18. Cui W.J., Ostrander L.E., Lee B.Y. In vivo reflectance of blood and tissue as a function of light wavelength. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 1990, vol. 37, no. 6, pp. 632–639. <https://doi.org/10.1109/10.55667>
19. Kamshilin A.A., Nippolainen E., Sidorov I.S., Vasilev P.V., Erofeev N.P., Podolian N.P., Romashko R.V. A new look at the essence of the imaging photoplethysmography. *Scientific Reports*, 2015, vol. 5, no. 1, pp. 10494. <https://doi.org/10.1038/srep10494>
20. Lyubashina O.A., Mamontov O., Volynsky M., Zaytsev V.V., Kamshilin A.A. Contactless assessment of cerebral autoregulation by

photoplethysmographic imaging at green illumination // *Frontiers in Neuroscience*, 2019. V. 13. P. 1235. <https://doi.org/10.3389/fnins.2019.01235>

21. Allen J. Photoplethysmography and its application in clinical physiological measurement // *Physiological Measurement*. 2007. V. 28. N 3. P. R1–R39. <https://doi.org/10.1088/0967-3334/28/3/R01>

Авторы

Белавенцева Анжелика Вадимовна — младший научный сотрудник, Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, 690041, Российская Федерация, [sc 57192421923](https://orcid.org/0000-0001-8218-6766), <https://orcid.org/0000-0001-8218-6766>, ange202@mail.ru

Подольня Наталья Петровна — кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник, Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, 690041, Российская Федерация, [sc 56707708600](https://orcid.org/0000-0002-2108-4376), <https://orcid.org/0000-0002-2108-4376>, podolian@iacp.dvo.ru

Волюнский Максим Александрович — кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, 690041, Российская Федерация; доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 23006901100](https://orcid.org/0000-0003-1679-4450), <https://orcid.org/0000-0003-1679-4450>, maxim.volynsky@gmail.com

Зайцев Валерий Викторович — младший научный сотрудник, Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, 690041, Российская Федерация; младший научный сотрудник, Национальный медицинский исследовательский центр им. В.А. Алмазова Минздрава России, Санкт-Петербург, 197341, Российская Федерация, [sc 57193801729](https://orcid.org/0000-0003-3366-8376), <https://orcid.org/0000-0003-3366-8376>, zaytsevphoto@gmail.com

Саковская Анастасия Владимировна — кандидат медицинских наук, младший научный сотрудник, Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, 690041, Российская Федерация; доцент, Тихоокеанский государственный медицинский университет, Владивосток, 690002, Российская Федерация, [sc 57203402443](https://orcid.org/0000-0002-4077-9739), <https://orcid.org/0000-0002-4077-9739>, sakovska86@mail.ru

Мамонтов Олег Викторович — доктор медицинских наук, ведущий научный сотрудник, Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, 690041, Российская Федерация; старший научный сотрудник, Национальный медицинский исследовательский центр им. В.А. Алмазова Минздрава России, Санкт-Петербург, 197341, Российская Федерация; ассистент, Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет имени Павлова, Санкт-Петербург, 197022, Российская Федерация, [sc 6505846605](https://orcid.org/0000-0003-3063-439X), <https://orcid.org/0000-0003-3063-439X>, mamontoffoleg@gmail.com

Ромашко Роман Владимирович — доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, руководитель лаборатории, Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, 690041, Российская Федерация, [sc 6603647454](https://orcid.org/0000-0003-0869-0993), <https://orcid.org/0000-0003-0869-0993>, romashko@dvo.ru

Камшилин Алексей Александрович — доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, 690041, Российская Федерация, [sc 7007138092](https://orcid.org/0000-0003-2506-9736), <https://orcid.org/0000-0003-2506-9736>, alexei.kamshilin@yandex.ru

photoplethysmographic imaging at green illumination. *Frontiers in Neuroscience*, 2019, vol. 13, pp. 1235. <https://doi.org/10.3389/fnins.2019.01235>

21. Allen J. Photoplethysmography and its application in clinical physiological measurement. *Physiological Measurement*, 2007, vol. 28, no. 3, pp. R1–R39. <https://doi.org/10.1088/0967-3334/28/3/R01>

Authors

Anzhelika V. Belaventseva — Junior Researcher, Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, 690041, Russian Federation, [sc 57192421923](https://orcid.org/0000-0001-8218-6766), <https://orcid.org/0000-0001-8218-6766>, ange202@mail.ru

Natalia P. Podolyan — PhD (Physics & Mathematics), Junior Researcher, Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, 690041, Russian Federation, [sc 56707708600](https://orcid.org/0000-0002-2108-4376), <https://orcid.org/0000-0002-2108-4376>, podolian@iacp.dvo.ru

Maxim A. Volynsky — PhD (Technical science), Associate Professor, Leading Researcher, Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, 690041, Russian Federation; Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 23006901100](https://orcid.org/0000-0003-1679-4450), <https://orcid.org/0000-0003-1679-4450>, maxim.volynsky@gmail.com

Valery V. Zaytsev — Junior Researcher, Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, 690041; Junior Researcher, Almazov National Medical Research Centre, Saint Petersburg, 197341, Russian Federation, [sc 57193801729](https://orcid.org/0000-0003-3366-8376), <https://orcid.org/0000-0003-3366-8376>, zaytsevphoto@gmail.com

Anastasiia V. Sakovskaia — PhD (Medicine), Junior Researcher, Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, 690002, Russian Federation; Associate Professor, Pacific State Medical University, Vladivostok, 690002, Russian Federation, [sc 57203402443](https://orcid.org/0000-0002-4077-9739), <https://orcid.org/0000-0002-4077-9739>, sakovska86@mail.ru

Oleg V. Mamontov — D.Sc. (Medicine), Leading Researcher, Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, 690041, Russian Federation; Senior Researcher, Almazov National Medical Research Centre, Saint Petersburg, 197341, Russian Federation; Assistant, Pavlov First Saint Petersburg State Medical University, Saint Petersburg, 197022, Russian Federation, [sc 6505846605](https://orcid.org/0000-0003-3063-439X), <https://orcid.org/0000-0003-3063-439X>, mamontoffoleg@gmail.com

Roman V. Romashko — D.Sc. (Physics & Mathematics), Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Head of Laboratory, Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, 690041, Russian Federation, [sc 6603647454](https://orcid.org/0000-0003-0869-0993), <https://orcid.org/0000-0003-0869-0993>, romashko@dvo.ru

Alexei A. Kamshilin — D.Sc. (Physics & Mathematics), Senior Researcher, Chief Researcher, Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, 690041, Russian Federation, [sc 7007138092](https://orcid.org/0000-0003-2506-9736), <https://orcid.org/0000-0003-2506-9736>, alexei.kamshilin@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 24.10.2022
Одобрена после рецензирования 29.11.2022
Принята к печати 29.01.2023

Received 24.10.2022
Approved after reviewing 29.11.2022
Accepted 29.01.2023



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»