

УДК535.8

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОРЕГУЛЯТОРНОЙ ВАЗОДИЛАТАЦИИ СОСУДОВ МЕТОДОМ ВИЗУАЛИЗИРУЮЩЕЙ ФОТОПЛЕТИЗМОГРАФИИ

Анжелика Вадимовна Белавенцева*, Наталья Петровна Подолян*, Максим Александрович Вольнский**, Валерий Викторович Зайцев***, Анастасия Владимировна Саковская****, Олег Викторович Мамонтов*, Роман Владимирович Ромашко*, Алексей Александрович Камшилин*

*Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, г. Владивосток, Россия

**Национальный исследовательский университет ИТМО, г. Санкт-Петербург, Россия

***ФГБУ Национальный медицинский исследовательский центр им. В.А. Алмазова Минздрава России, г. Санкт-Петербург, Россия

****Институт терапии и инструментальной диагностики ФГБОУ ВО ТГМУ Минздрава России, г. Владивосток, Россия

Аннотация

В работе представлены результаты исследования реакции кожного кровотока на локальный нагрев методом визуализирующей фотоплетизмографии, позволяющим неинвазивно оценить амплитудно-временные параметры микроциркуляции в зависимости от тонуса сосудов. Показано, что предложенный метод достоверно отражает функцию механизмов регуляции периферического сосудистого сопротивления, что имеет большое прогностическое значение для выявления первичных сердечно-сосудистых заболеваний

Ключевые слова

Микроциркуляция, фотоплетизмография, терморегуляция, эндотелиальная дисфункция, перфузия

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 21-15-00265

THE STUDY OF THERMOREGULATORY VASODILATION OF BLOOD VESSELS BY IMAGING PHOTOPLETHYSMOGRAPHY

Anzhelika V. Belaventseva, Natalia P. Podolyan, Maxim A. Volynsky, Valery V. Zaytsev, Anastasiia V. Sakovskaia, Oleg V. Mamontov, Roman V. Romashko, Alexei A. Kamshilin

*Institute for Automation and Control Processes of FEB RAS, Radio St., Vladivostok, Russia

**ITMO University, St. Petersburg, Russia

***Almazov Federal Heart, Blood and Endocrinology Center, Akkuratova St., St. Petersburg, Russia

****Institute of Therapy and Instrumental Diagnostics, Pacific State Medical University, Vladivostok, Russia

Abstract

The paper presents the results of the study of the response of skin blood flow to local heating by a method of imaging photoplethysmography, which allows noninvasively assess the amplitude-time parameters of microcirculation depending on vascular tone. It has been shown that the proposed method reliably reflects the function of the mechanisms of peripheral vascular resistance regulation, which is of great prognostic value for the detection of primary cardiovascular diseases

Keywords

Microcirculation, photoplethysmography, thermoregulation, endothelial dysfunction, blood perfusion

Acknowledgements

The Russian Science Foundation financially supported the research (Grant 21-15-00265)

Введение

Работу системы микроциркуляции обеспечивает целый ряд функциональных процессов, регулируемых гормональной и вегетативной нервной системой. Важными эндогенными регуляторами сердечно-сосудистой системы, синтезируемыми в клетках эндотелия являются вазодилататоры и вазоконстрикторы [1]. При любых патологических изме-

нениях в сосудах выявляют дисбаланс секретируемых эндотелием оксида азота (NO) и других биологически активных веществ.

Для оценки нарушений микроциркуляции крови при различных сердечно-сосудистых патологиях, в том числе и эндотелиальной дисфункции, в медицинской практике широко применяется метод тепловых проб. Среди неинвазивных оптических методов оценки реакции кровотока на локальный нагрев широко используют метод лазерной доплеровской флуометрии (ЛДФ) [2]. Основным недостатком данного метода является низкая воспроизводимость и чувствительность результатов к условиям проведения исследования. Кроме того, датчик ЛДФ оценивает параметры кровотока в одной точке контакта с кожей. В рамках данной работы предлагается использовать метод визуализирующей фотоплетизмографии (ВФПГ), который позволяет оценить изменения перфузии крови в ответ на локальный нагрев бесконтактно, что значительно повышает достоверность полученных результатов [3].

Метод визуализирующей фотоплетизмографии

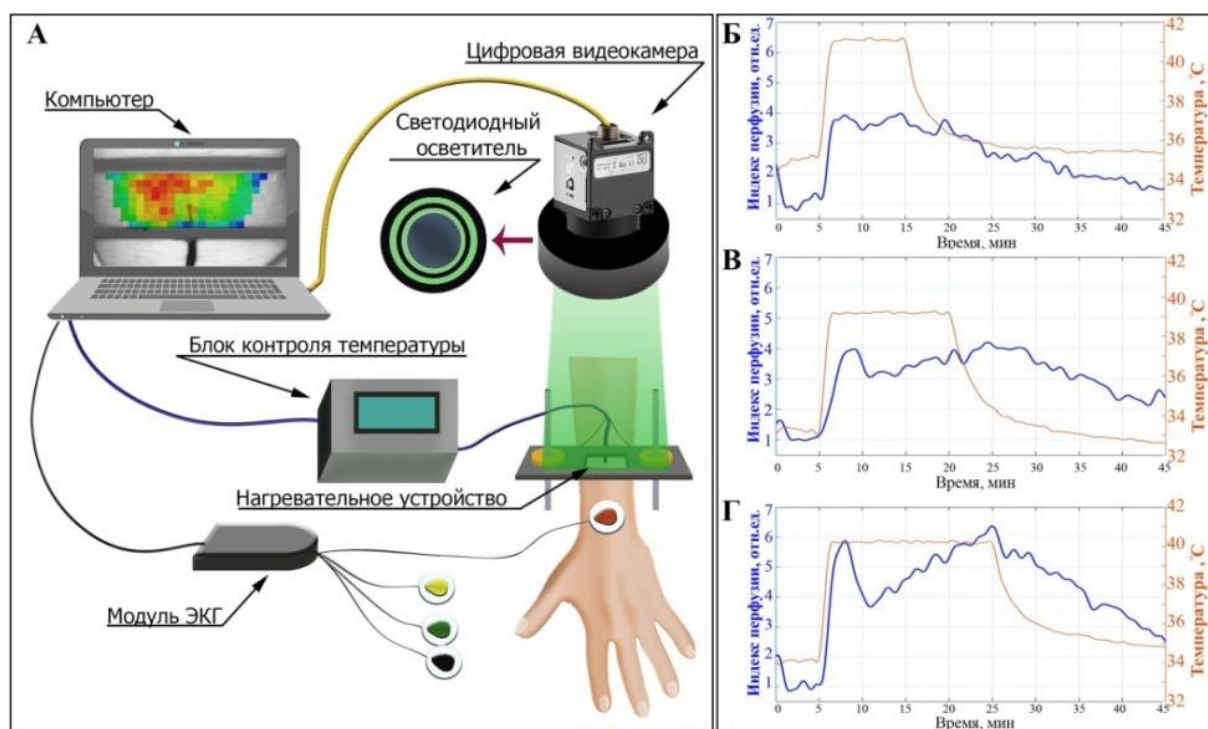


Рисунок. Блок-схема измерительной системы (А). Отклик перфузии на локальный нагрев при различной его длительности (Б, В, Г). Синие кривые показывают изменение индекса перфузии, а красные – температуры кожи

Схема измерительной системы показана на рисунке (А). На внешнюю область предплечья под контролируемым небольшим давлением накладывалась стеклянная пластина с прозрачным токопроводящим слоем, обеспечивающим локальный нагрев исследуемого участка. Эта область равномерно освещалась зелёными светодиодами ($\lambda = 530 \pm 25$ нм), и изображение в отражённом свете записывалось цифровой видеокамерой. Хорошо известно [4], что именно зелёный свет приобретает наибольшую модуляцию на частоте сердцебиений после взаимодействия с биологической тканью, содержащей кровеносные сосуды несмотря на то, что глубина его проникновения в кожу не превышает 0,5 мм. В рамках альтернативной модели формирования фотоплетизмографического

сигнала эта модуляция обусловлена механическим изменением плотности капилляров в дерме вследствие пульсаций близлежащих артерий и артериол [5]. Таким образом, капиллярное русло оказывается распределённым преобразователем пульсаций глуболежащих артерий в модуляцию света на частоте сердцебиений. Поскольку амплитуда артериальных пульсаций определяет перфузию крови в исследуемой области (чем больше амплитуда пульсаций, тем выше перфузия), то амплитуда модуляции света на частоте сердцебиений характеризует локальную перфузии исследуемого участка [6]. Соответственно, пространственные распределения амплитуды модуляции изображения на частоте сердцебиений отражают распределение перфузии.

Отраженный свет регистрировался монохромной 8-разрядной видеокамерой (UI-3060CP-M-GL), в процессе видеозаписи, которая проводилась синхронно с записью электрокардиограммы для последующего надёжного выделения модуляции на частоте сердцебиений. Видеокадры с фокусированными изображениями освещенного участка кожи записывались на персональный компьютер через универсальную последовательную шину (USB) совместно с электрокардиограммой и обрабатывались с помощью специального программного обеспечения, реализованного на платформе Matlab. Исходный сигнал каждого пикселя изображения состоит из переменной составляющей (AC), модулированной на частоте сердцебиений, и медленно меняющейся (DC), которая относится к низкочастотным модуляциям, обусловленными процессами дыхания и действиями нервной системы. Для построения карт распределения перфузии мы использовали отношение AC/DC, которое уменьшает влияние неоднородности освещения и рельефа кожи на вычисляемый индекс перфузии [6]. Для уменьшения влияния бликов от верхнего слоя эпидермиса и нагревательного элемента использовался метод поляризационной фильтрации, реализованный посредством установки тонкопленочных поляризаторов со взаимно ортогональной ориентацией после светодиодов и перед камерой.

При обработке изображений для получения достоверного сигнала пульсовой волны в каждом пикселе начало каждого импульса нормализованного сигнала AC/DC совмещалось с соответствующим R-пиком электрокардиограммы и затем пульсовые волны в 15 последовательных кардиоциклах усреднялись для вычисления индекса перфузии в каждом пикселе [4, 6]. Индекс перфузии рассчитывался, как разность максимального и минимального значения, усреднённого по 15 кардиоциклам отношения AC/DC.

Локальный нагрев кожи осуществлялся прозрачной токопроводящей пластиной, до температуры $41 \pm 1^\circ\text{C}$ и контролировался компьютером. Токопроводящий слой не контактировал с кожей. Для обеспечения теплопроводности между стеклянной пластиной и кожей наносили вазелин. С помощью термопары, расположенной между пластиной и кожей, контролировалась температура последней.

Все измерения проводились в затемненной лаборатории без внешнего освещения, при температуре окружающей среды 23°C . Обследовано 6 здоровых добровольцев, в возрасте 44 ± 6 лет. Для каждого из них проведено по три теста длительностью 7, 15 и 20 минут (рисунок б, в и г). Исследования выполнены с разрешения междисциплинарного комитета по этике ФГБОУ ВО ТГМУ Минздрава России, протокол №10 от 21.06.2021.

Результаты и выводы

Локальный нагрев кожных покровов после включения нагревательной пластины вызывает вазодилатацию, обусловленную аксонным рефлексом, что приводит к быстрому росту перфузии. Было замечено, что возрастание перфузии зависит как от начальной температуры кожи, так и от разницы температуры её нагрева. Проведенный регрессионный анализ показал достоверную положительную корреляцию роста перфузии с разницей тем-

ператур ($r=0,92$, $p<0,001$) и отрицательную с начальной температурой ($r=-0,90$, $p<0,001$). Обнаружено, что форма сигнала сильно зависит от длительности нагрева. Продолжительный нагрев, вслед за падением перфузии и появлением локального минимума на кривой, вызывает увеличение кровотока, что приводит к росту перфузии и появлению второго максимума (рисунок в и г). Такой рост перфузии связан с активацией эндотелиального компонента вазодилатации NO. Полученные кривые соответствуют характерной зависимости реакции кожного кровотока на локальный нагрев. Аналогичные зависимости были получены при исследованиях с помощью ЛДФ [2]. Таким образом, предложенный метод ВФПГ достоверно отражает функцию механизмов регуляции периферического сосудистого сопротивления, что может в перспективе позволить исследовать различные физиологические нарушения, вызванные эндотелиальными патологиями.

Литература

- [1] Gimbrone Jr M. A., García-Cardena G. Endothelial cell dysfunction and the pathobiology of atherosclerosis //Circulation research. – 2016. – V. 118. – Is. 4. – P. 620–636.
- [2] Cracowski J.L., Minson C., Salvat-Melis M., and Halliwill J. Methodological issues in the assessment of skin microvascular endothelial function in humans //Trends in pharmacological sciences. – 2006. – V. 27. – Is. 9. – P. 503–508.
- [3] Volynsky M.A., Margaryants N.B., Mamontov O.V., and Kamshilin A.A. Contactless monitoring of microcirculation reaction on local temperature changes //Applied Sciences. – 2019. – V. 9. – Is. 22. – P. 4947.
- [4] Cui W., 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. – Is. 6. – P. 632-639.
- [5] 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. – Is. 1. – P. 1-9.
- [6] Lyubashina, O.A., Mamontov, O.V., Volynsky, M.A., 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.