УДК 612-092.6

DOI: 10.24884/1682-6655-2020-19-4-87-91

А.А. ФЕДОРОВИЧ^{1,2}, А.Ю. ГОРШКОВ¹, О.М. ДРАПКИНА¹

Современные возможности неинвазивного исследования и дистанционного мониторинга капиллярного кровотока в коже человека

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный медицинский исследовательский центр терапии и профилактической медицины» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Москва, Россия
101990, Россия, Москва, Петроверигский пер., д. 10/3

² Федеральное государственное бюджетное учреждение «Главный научный центр Российской Федерации "Институт медико-биологических проблем" Российской академии наук», Москва, Россия
123007, Россия, Москва, Хорошевское шоссе, д. 76А
E-mail: faa-micro@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 23.09.20; принята к печати 30.10.20

Резюме

Краткий обзор посвящен последним достижениям в области неинвазивного исследования капиллярного кровотока у человека на основе разработок российских ученых. Современные компьютерные технологии существенно расширили возможности исследователей и позволяют получать информацию о фундаментальных процессах на уровне обменного звена сосудистого русла не только в условиях стационара, но и в режиме удаленного доступа, что крайне актуально в условиях пандемии, обусловленной вирусом SARS-CoV-2.

Ключевые слова: капилляроскопия, скорость капиллярного кровотока, веб-камера, фотоплетизмография, дистанционный мониторинг

Для цитирования: Федорович А. А., Горшков А. Ю., Драпкина О. М. Современные возможности неинвазивного исследования и дистанционного мониторинга капиллярного кровотока в коже человека. Регионарное кровообращение и микроциркуляция. 2020;19(4):87–91. Doi: 10.24884/1682-6655-2020-19-4-87-91.

UDC 612-092.6

DOI: 10.24884/1682-6655-2020-19-4-87-91

А. А. FEDOROVICH^{1, 2}, А. Yu. GORSHKOV¹,
О. М. DRAPKINA¹

Modern possibilities of non-invasive research and remote monitoring of capillary blood flow in human skin

¹ National Medical Research Center for Therapy and Preventive Medicine, Moscow, Russia
10/3, Petroverigskiy lane, Moscow, Russia, 101990

² The Russian Federation State Research Center – Institute of Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
76A, Khoroshevskoe highway, Moscow, Russia, 123007
E-mail: faa-micro@yandex.ru

Received 23.09.20; accepted 30.10.20

Summary

A brief review is dedicated to the latest advances in the field of non-invasive studies of capillary blood flow in humans based on the developments of Russian scientists. Modern computer technologies have significantly expanded the capabilities of researchers and make it possible to obtain information about fundamental processes at the level of the metabolic link of the vascular bed not only in a hospital setting, but also in a remote access mode, which is extremely important in the context of a pandemic caused by the SARS-CoV-2 virus.

Keywords: capillaroscopy, capillary blood flow velocity, webcam, photoplethysmography, remote monitoring

For citation: Fedorovich A. A., Gorshkov A. Yu., Drapkina O. M. Modern possibilities of non-invasive research and remote monitoring of capillary blood flow in human skin. Regional hemodynamics and microcirculation. 2020;19(4):87–91. Doi: 10.24884/1682-6655-2020-19-4-87-91.

Введение

Благодаря развитию микроэлектроники и компьютерных технологий, последние два десятилетия ознаменовались бурным развитием методов для неинвазивного исследования микроциркуляторного кро-

вотока у человека. Подавляющее большинство новых методов исследования относятся к области биофотоники и основаны на анализе взаимодействия различных видов излучения (свет, лазер, тепло) с биологическими тканями – лазерная доплеровская флоуметрия

Рис. 1. Расчет скорости капиллярного кровотока одновременно в нескольких капиллярах ногтевого ложа методом «опорного кадра» по И. Гурову и др. [4]: а – капиллярная сеть в поле зрения с выделенными капиллярами; б – скорость потока эритроцитов, измеренная высокоскоростным методом видеокапилляроскопии для нескольких капилляров одновременно

Fig. 1. Calculation of the speed of capillary blood flow simultaneously in several capillaries of the nail bed using the «reference frame» method according to Gurov et al. [4]: а – capillary network in the field of view with highlighted capillaries; б – erythrocyte flow rate measured by high-speed video capillaroscopy for several capillaries simultaneously

и лазерная спекл-контрастная визуализация, диффузная спектроскопия отражения и визуализации, флуоресцентная спектроскопия и визуализация, оптическая когерентная томография, конфокальная микроскопия, фотоплетизмография, инфракрасная спектроскопия, термография высокого разрешения и др. Несмотря на широкие возможности данных методов, ни один из них не позволяет оценивать характер кровотока непосредственно в капиллярах, на уровне которых происходят обменные процессы, обеспечивающие поддержание тканевого гомеостаза.

Видеокапилляроскопия

Непосредственная визуализация капиллярного русла возможна методом капилляроскопии, который можно считать одним из первых методов биофотоники. С 20-х до 60-х гг. XX в. результаты исследований капиллярного русла кожи человека носили описательный характер, ограничиваясь субъективной оценкой исследователями формы капилляров, их распределения в ногтевом ложе и других признаков. С внедрением телевизионной техники метод капилляроскопии перешел в разряд видеокапилляроскопии, позволяя регистрировать характер капиллярного кровотока в динамике. Было предложено несколько методов для расчета скорости капиллярного кровотока (покадровый, взаимно-корреляционный, метод движущихся пятен), однако точность оценки была недостаточной. Внедрение компьютерных технологий и цифровых видеокамер существенно повысило информативность видеокапилляроскопии, позволяя получать объективные данные – размер капилляров в различных отделах (артериальный, переходный, венозный), степень гидратации интерстициального пространства (размер перикапиллярной зоны), число капилляров на единицу площади, скорость капиллярного кровотока [1, 2].

Корректное измерение скорости капиллярного кровотока (СКК) является очень сложной задачей.

Это обусловлено неконтролируемым смещением участка поверхности кожи при больших увеличениях и одновременным динамическим смещением потока эритроцитов в капиллярах, что приводит к появлению «оптических шумов», которые при автоматическом расчете СКК проявляется в виде частых высокоамплитудных выбросов [1]. Данную сложную задачу сегодня решили российские ученые из Университета ИТМО (Санкт-Петербург), предложив метод «опорного кадра» [3]. Данный алгоритм позволяет не только нивелировать проблемы высокоскоростной видеосъемки капиллярного кровотока при большом увеличении и получать корректные результаты гемодинамических параметров, но и рассчитывать СКК одновременно сразу в нескольких капиллярах ногтевого ложа (рис. 1), что раньше для исследователей было совершенно недоступной опцией [4].

Предложенный авторами [5] метод компенсации смещений с помощью «опорного кадра» позволяет оценивать СКК не только в области ногтевого ложа, но и в других участках кожного покрова, где капилляры расположены перпендикулярно относительно поверхности кожи, а у самой поверхности располагается только переходный отдел. Предложенный авторами подход к получению и анализу информации о капиллярном кровотоке в коже существенно расширяет возможности применения метода видеокапилляроскопии в различных клинических ситуациях – трофические нарушения кожных покровов различного генеза (артериального, венозного, диабетического), при дерматологических заболеваниях, различных системных процессах ревматологического или эндокринологического профиля и других патологических процессах.

Веб-фотоплетизмография

В процессе освоения и внедрения в научную работу достижений современной микроэлектроники было выявлено, что чувствительность стандартной

Рис. 2. Веб-фотоплетизмография: 1 – исходный сигнал в динамике (10 с); 2 – фильтрованный сигнал в динамике (10 с); 3 – гистограмма R-R интервала на протяжении всего периода регистрации (180 с); 4 – скаттерограмма пар R-R интервала (180 с); 5 – фильтрованный сигнал на протяжении всего периода видео регистрации (180 с)

Fig. 2. Web photoplethysmography: 1 – original signal in dynamics (10 s); 2 – filtered signal in dynamics (10 s); 3 – histogram of the R-R interval throughout the entire recording period (180 s); 4 – scatterogram of R-R interval pairs (180 s); 5 – filtered signal throughout the entire registration period (180 s)

веб-камеры является достаточным для получения информации физиологического характера. В основе метода лежит анализ изменения контрастности пикселей при видеозаписи кожного покрова. Непосредственно у поверхности кожи (на глубине около 100–150 мкм) залегают переходные отделы капилляров, которые представляют собой противоположный сердцу «полюс» большого круга кровообращения, где осуществляется переход артериальной системы в венозную. Динамические изменения кровотока в переходных отделах капилляров кожи и приводят к изменению контрастности пикселей, которые регистрирует стандартная веб-камера.

В 2010 г. появились первые сообщения о возможности оценивать частоту сердечного ритма с помощью веб-камеры [6, 7]. В 2012 г. С. G. Scully et al. [8] показали возможность извлечения из видеозаписей веб-камеры смартфона информации не только о частоте сердечных сокращений, но и частоте дыхательных движений и сатурации кислорода. Авторы отмечают, что получаемые с помощью веб-камеры данные очень хорошо согласуются с данными общепризнанных инструментальных методов исследования данных показателей. В 2018 г. был опубликован мета-анализ 14 исследований (суммарно около

400 испытуемых), в которых сопоставлялись данные частоты сердечных сокращений, определенных с помощью веб-камеры смартфонов и проверенными клиническими методами [9]. Анализ показал очень высокую согласованность полученных результатов. В том же году В. P. Yan et al. [10] приводят результаты исследования частоты сердечного ритма с помощью 12-канального ЭКГ и веб-камеры смартфона с кожи лица и подушечки пальцев кисти у 217 пациентов кардиологического отделения университетской клиники. Чувствительность и специфичность анализа сердечного ритма при веб-фотоплетизмографии в коже лица составила 94,7 и 95,8 %, а при пальцевой веб-фотоплетизмографии 94,7 и 93,0 % соответственно. В дальнейшем, используя методы глубокого машинного обучения с элементами искусственного интеллекта, авторы [11] разработали алгоритм оценки и анализа сердечного ритма с помощью одной веб-камеры с расстояния в 1,5 м одновременно у 5 человек, выявляя наличие фибрилляции предсердий.

Диагностические возможности веб-камеры существенно шире, чем только определение параметров сердечного ритма. Российскими специалистами разработано программное обеспечение, позволяющее получать информацию о вазомоторной активности

а

б

Рис. 3. а – программно-аппаратный комплекс (ПАК): 1 – веб-камера; 2 – подсветка; 3 – дальномер; 4 – микрофон; 5 – анализатор газового состава выдыхаемого воздуха; 6 – инфракрасный термометр; 7 – датчик температуры и влажности выдыхаемого воздуха; б – ПАК (А) интегрирован в единый блок с планшетным компьютером и автоматическим тонометром

Fig. 3. а – hardware and software complex (HSC): 1 – webcam; 2 – backlight; 3 – range finder; 4 – microphone; 5 – analyzer of gas composition of exhaled air; 6 – infrared thermometer; 7 – sensor of temperature and humidity of exhaled air; б – HSC (A) is integrated into a single unit with a tablet computer and an automatic tonometer

прекапиллярных артериол, которые непосредственно формируют параметры капиллярной гемодинамики, модулируя притекающий объем артериальной крови до оптимальных для трансапикалярного обмена значений. На рис. 2 приведен пример исследования капиллярного кровотока с помощью веб-камеры обычного ноутбука. Объект исследования (лицо) делится на четыре области, в каждой из которых оценивается характер кровотока. На рис. 2, 2 видны изменения амплитуды пульсовых колебаний в переходных отделах капилляров на протяжении 10 с, а на рис. 2, 5 характер кровотока на протяжении всего периода видео регистрации (3 мин).

Учитывая особенности кровоснабжения и иннервации кожи лица и других участков кожного покрова тела человека [12, 13], применение метода веб-фотоплетизмографии существенно расширяет диагностические возможности и открывает новые клинические и научные горизонты.

Исследования физиологического состояния человека с помощью веб-камеры можно существенно расширить. Российские исследователи (фонд «Медиа») предлагают интегрировать в единый программно-аппаратный комплекс (ПАК) веб-камеру, инфракрасный термометр, газоанализатор выдыхаемого воздуха, анализатор температуры и влажности выдыхаемого воздуха, дальномер, микрофон (рис. 3, а). Наличие дальномера и подсветки позволяет стандартизировать процесс исследования и получать наиболее корректные данные. Веб-камера и ИК-термометр дают информацию о температуре кожи, характере ее перфузии, частоте сердечного ритма. Микрофон, газоанализатор и анализатор температуры и влажности выдыхаемого воздуха совместно дают дополнительную информацию о дыхательной деятельности человека. Разработчики предлагают вариант интеграции

ПАК с планшетным компьютером и автоматическим тонометром в единый блок (рис. 3, б), что расширяет функциональные возможности прибора и ускоряет процесс обмена данными между пациентом и лечебно-консультативным медицинским учреждением.

Заключение

Разработки отечественных ученых в области неинвазивного исследования капиллярного кровотока у человека являются крайне актуальными в условиях сложившейся эпидемиологической обстановки. Сегодня уже является достоверно установленным фактом, что основные нарушения при COVID-19 развиваются именно на уровне микрососудистого русла с развитием системной дисфункции эндотелия (вазомоторной и обменной) и активацией тромбоцитарно-сосудистого звена гемостаза. В патологический процесс вовлекаются все органы и системы, включая и кожу. Применение видеокапилляроскопии на основе «опорного кадра» позволит в условиях стационара объективизировать имеющиеся нарушения капиллярной гемодинамики. Веб-фотоплетизмографию можно проводить не только на госпитальном этапе, но и в домашних условиях на догоспитальном этапе и в период реконвалесценции в режиме удаленного мониторинга, учитывая широкое распространение веб-камер среди населения.

Конфликт интересов / Conflict of interest

Авторы заявили об отсутствии конфликта интересов. / The authors declare no conflict of interest.

Литература / References

1. Федорович А. А. Капиллярная гемодинамика в эпонихии верхней конечности // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. – 2006. – № 1 (19). – С. 20–29. [Fedorovich AA. Capillary hemodynamics in the nail bed

of fingers. Regional blood circulation and microcirculation. 2006;1(19):20–29. (In Russ.).

2. Новый подход к интегральной оценке состояния сердечно-сосудистой системы у пациентов с артериальной гипертензией / Ю. И. Гурфинкель, О. Ю. Атьков, М. Л. Сасонко, Р. М. Саримов // Рос. кардиол. журн. – 2014. – № 1 (105). – С. 101–106. [Gurfinkel YuI, Atkov OYu, Sasonko ML, Sarimov RM. A new approach to the integral assessment of the state of the cardiovascular system in patients with arterial hypertension. Russian Journal of Cardiology. 2014;1(105):101–106. (In Russ.).]

3. Gurov IP, Volkov MV, Margaryants NB, Potemkin AV. Method of bringing locally varying images into coincidence in video capillaroscopy. J Optical Technology. 2019;86(12):35–42. Doi: 10.1364/JOT.86.000774.

4. Gurov I, Volkov M, Margaryants N, Pimenov A, Potemkin A. High-speed video capillaroscopy method for imaging and evaluation of moving red blood cells. Optics and Laser in Engineering. 2018;104:244–251. Doi: 10.1016/j.optalas-eng.2017.09.003.

5. Margaryants NB, Sidorov IS, Volkov MV, Gurov IP, Mamonov OV, Kamshilin AA. Visualization of skin capillaries with moving red blood cells in arbitrary area of the body. Biomedical Optics Express. 2019;10(9):4896–4906. Doi: 10.1364/BOE.10.004896.

6. Poh MZ, McDuff DJ, Picard RW. Non-contact, automated cardiac pulse measurements using video imaging and blind source separation. Optics Express. 2010;18(10):10762–10774. Doi: 10.1364/OE.18.010762.

7. Pelegris P, Banitsas K, Orbach T, Marias K. A novel method to detect Heart Beat Rate using a mobile phone. Conf Proc IEEE Eng Eng Med Biol Soc. 2010:5488–5491. Doi: 10.1109/IEMBS.2010.5626580.

8. Scully CG, Lee J, Meyer J, Gorbach AM, Granquist-Fraser D, Mendelson YM, Chon KH. Physiological parameter monitoring from optical recordings with a mobile phone. IEEE Trans Biomed Eng. 2012;59(2):303–306. Doi: 10.1109/TBME.2011.2163157.

9. De Ridder B, Van Rompaey B, Kampen JK, Haine S, Dilles T. Smartphone apps using photoplethysmography for heart rate monitoring: Meta-analysis. JMIR Cardio. 2018;2(1):e4. Doi: 10.2196/cardio.8802.

10. Yan BP, Lai WHS, Chan CKY, Chan SC, Chan LH, Lam KM et al. Contact-free screening of atrial fibrillation by a smartphone using facial pulsatile photoplethysmographic signals. J Am Heart Assoc. 2020;7(8):e008585. Doi: 10.1161/JAHA.118.008585.

11. Yan BP, Lai WHS, Chan CKY, Au ACK, Freedman B, Poh YC, Poh MZ. High-throughput, contact-free detection of atrial fibrillation from video with deep learning. JAMA Cardiol. 2020;5(1):105–107. Doi: 10.1001/jamacardio.2019.4004.

12. Fedorovich AA, Drapkina OM, Pronko KN, Sinopalnikov VI, Zemskov VM. Telemonitoring of capillary blood flow in the human skin: new opportunities and prospects. Clinical Practice 2018;15(2):561–567. Doi: 10.4172/clinical-practice.1000390.

13. Федорович А. А., Драпкина О. М. Веб-капилляроскопия – новый метод неинвазивного исследования микроциркуляторного кровотока в коже человека // Профилактика. медицина. – 2020. – № 23 (4). – С. 100–103. [Fedorovich AA., Drapkina OM. Web capillaroscopy is a new method for non-invasive study of microcirculatory blood flow in human skin. Preventive Medicine. 2020;23(4):100–103. (In Russ.).] Doi: 10.17116/profmed202023041100.

Информация об авторах

Федорович Андрей Александрович – канд. мед. наук, старший научный сотрудник Отдела фундаментальных и прикладных аспектов ожирения, НИИЦ терапии и профилактической медицины, старший научный сотрудник лаборатории физиологии кардиореспираторной системы и баромедицины, Институт медико-биологических проблем РАН, Москва, Россия, e-mail: faa-micro@yandex.ru, ORCID: 0000-0001-5140-568X.

Горшков Александр Юрьевич – канд. мед. наук, научный сотрудник Отдела фундаментальных и прикладных аспектов ожирения, Национальный медицинский исследовательский центр терапии и профилактической медицины, Москва, Россия, e-mail: aygorshkov@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1423-214X.

Драпкина Оксана Михайловна – д-р мед. наук, профессор, член-корреспондент РАН, директор НИИЦ терапии и профилактической медицины, Москва, Россия, e-mail: drapkina@bk.ru, ORCID: 0000-0002-4453-8430.

Authors information

Fedorovich Andrey A. – PhD, senior research officer of the development of fundamental and applied aspects of obesity, National Medical Research Center for Therapy and Preventive Medicine of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation, senior research officer of the laboratory of physiology of the cardiorespiratory system and baromedicine Research Center Institute of Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences (IBMP), Moscow, Russia, e-mail: faa-micro@yandex.ru, ORCID: 0000-0001-5140-568X.

Gorshkov Alexander Yu. – PhD, researcher officer of the development of fundamental and applied aspects of obesity, National Medical Research Center for Therapy and Preventive Medicine of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Moscow, Russia, e-mail: aygorshkov@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1423-214X.

Drapkina Oksana M. – Dr. of Medical Sciences, professor, Corresponding Member of Russian Academy of Science, director of Federal State Institution «National Medical Research Center for Therapy and Preventive Medicine» of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Moscow, Russia, e-mail: drapkina@bk.ru, ORCID: 0000-0002-4453-8430.