

ДИАГНОСТИКА ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЖИВЫХ ТКАНЯХ МЕТОДОМ ОПТИЧЕСКОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ПУЛЬСАЦИЙ КРОВИ

А. В. БЕЛАВЕНЦЕВА¹, Ю. Н. КУЛЬЧИН^{1,2}, Р. В. РОМАШКО^{1,2}, Т. С. ЗАПОРОЖЕЦ³,
Е. В. ПЕРСИЯНОВА³, Л. П. ЛЯХОВА², А. А. КАМШИЛИН⁴

¹Институт автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения РАН,
690041, Владивосток, Россия
E-mail: romashko@iacp.dvo.ru

²Дальневосточный федеральный университет, 690091, Владивосток, Россия

³НИИ эпидемиологии и микробиологии им. Г. П. Сомова, 690028, Владивосток, Россия

⁴Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия

Исследована возможность применения метода визуализации пульсаций крови для изучения процесса термической релаксации живых тканей человека. Экспериментально показано, что амплитуда пульсаций крови в ткани (Blood Pulsation Amplitude — ВРА) зависит от термического воздействия на нее; установлено, что процесс охлаждения тканей приводит к падению ВРА, а процесс нагревания тканей сопровождается ее ростом. Скорость увеличения ВРА является индивидуальной характеристикой субъекта, которая может служить параметром вазомоторной реактивности сосудов при изменении температуры.

Ключевые слова: микроциркуляция, терморегуляция, фотоплетизмография, пульсации крови, перфузия крови

Введение. Реакция микроциркуляции крови на внешнее воздействие может указать на наличие нарушений или дисфункции нервной системы, а также сосудистых заболеваний [1, 2]. Среди оптических методов оценки перфузии тканей кровью наиболее распространенными являются лазерная доплеровская визуализация (LDI), лазерная спекловая визуализация (LSCI), фотоплетизмография (PPG) и др. [3—9]. В настоящей статье приведены данные о возможности измерения реакции тканей человеческого тела на локальное термическое воздействие с помощью метода визуализации пульсаций крови (ВПК) [10], в основе которого лежит метод фотоплетизмографии [5].

Материалы и метод исследования. Исследование проводилось в соответствии с этическими стандартами, изложенными в Хельсинкской декларации от 1964 г. В исследовании в качестве добровольцев приняли участие 7 мужчин и 2 женщины. Отсутствие сердечно-сосудистых заболеваний и сахарного диабета подтверждено данными анамнеза. Эксперименты проводились в Институте автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения РАН (Владивосток).

Метод визуализации пульсаций крови. Схема измерительной системы, состоящей из цифровой видеокамеры (12-разрядная модель uEye UI-3360CP- NIR-GL фирмы „Imaging Development Systems GmbH“, объектив TECHSPEC® VIS-NIR, серия C, $f = 35$ мм, $NA = 0,021$) и источника света, представлена на рис. 1.

В процессе измерения испытуемому было предложено положить ладонь (исследуемая область) на стеклянную пластину, с обратной стороны которой размещены два светодиода ($\lambda = 525$ нм, $FWHM = 40$ нм, $P = 5$ Вт), обеспечивающие равномерное освещение ладони. Здесь же установлена видеокамера, обеспечивающая непрерывную видеозапись в течение 120 с с частотой 30 кадров/с и разрешением 1024×460 пкс в одном кадре. Видеокадры сохранялись на персональном компьютере в формате PNG. Следует отметить, что контакт ладони со стеклянной пластиной позволяет стабилизировать получаемое в процессе видеозаписи изображе-

ние и увеличить амплитуду сигнала за счет обеспечения более эффективной модуляции плотности капилляров пульсирующими артериями [11,12]. Для уменьшения влияния световых отражений от поверхностей стекла и ткани ладони был использован метод поляризационной фильтрации, посредством установки тонкопленочных поляризаторов перед каждым светодиодом и видеокамерой [13]. Поляризаторы видеокамеры и светодиодов взаимно ортогональны.

Регистрация температуры дистальных фаланг указательного и безымянного пальцев осуществлялась посредством термопары с частотой 2 Гц синхронно с записываемыми видеокдрами. Все измерения проводились в затемненной лаборатории без внешнего освещения при температуре окружающей среды 23 °С.

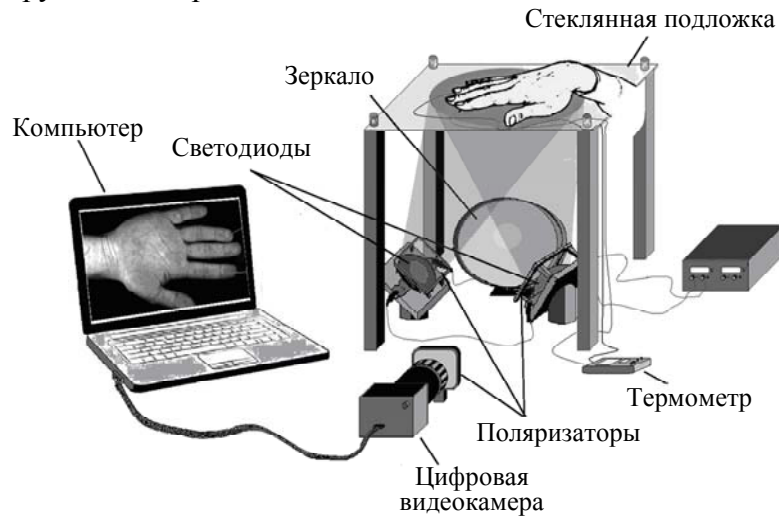


Рис. 1

Протокол эксперимента. На предварительной стадии дистальная фаланга указательного пальца испытуемого охлаждалась до температуры 15 °С путем погружения в смесь льда и воды при температуре 5 °С в течение 60 ± 2 с. Остальная часть ладони температурному воздействию не подвергалась. После охлаждения пальца ладонь испытуемого размещалась на стеклянной пластине, имеющую комнатную температуру 23 °С, что приводило к росту температуры ткани. При этом запускалась видеозапись, в процессе которой испытуемый сохранял покой, молчание и равномерное дыхание. Для каждого испытуемого было проведено по 6—8 циклов „охлаждение/нагревание“.

Обработка данных. Обработка потока видеок кадров базируется на методе синхронного усиления сигнала на частоте сердцебиения [10, 14]. В результате обработки в каждой точке видеоизображения (усредненной по области 11×11 пкс) формируется сигнал пульсаций крови PPG (рассчитываемый как отношение переменной его составляющей — АС к постоянной — DC [10, 14, 15]). Пространственное распределение амплитуды пульсаций крови (Blood Pulsation Amplitude — ВРА) по исследуемой области представлено на рис. 2, а, б, которые, в частности, позволяют определить так называемые „горячие“ точки — участки с повышенной амплитудой пульсаций. Именно в таких горячих областях следует ожидать наибольшей реакции кардиоваскулярной системы на температурные воздействия.

Результаты. *Динамика распределения ВРА.* Анализ карты распределения ВРА по ладони до нагревания указательного пальца и после нагревания (см. рис. 2, а, б соответственно) показывает, что амплитуда сигнала в предварительно охлажденной фаланге постепенно увеличивается в течение первых 40 с вследствие роста температуры ткани (пунктирная линия на рис. 2 в); в отличие от этого в безымянном пальце амплитуда сигнала перестает расти уже через 3 с, так как он не был предварительно охлажден (рис. 2, г). Эволюция DC-составляющей в выбранной точке предварительно охлажденного пальца и неохлажденного показана на рис. 2, д, е соответственно.

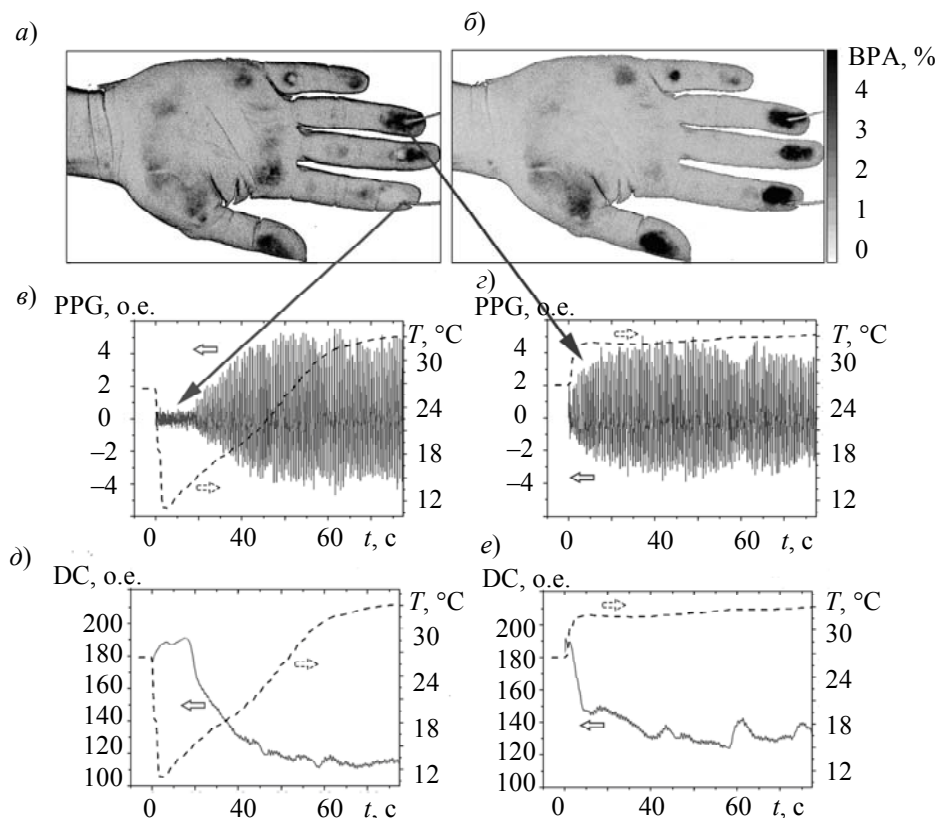


Рис. 2

Переменная составляющая АС — это амплитуда пульсаций крови, которая определяется работой сердечно-сосудистой системы, а постоянная составляющая DC — это интенсивность отраженного света, которая зависит от поглощения света тканями. Исходя из результатов исследования, можно заключить, что составляющая АС возрастает в $7,1 \pm 2,5$ раз, тогда как составляющая DC уменьшается в $2,5 \pm 0,25$ раз. Следовательно, индуцированное температурой увеличение PPG-сигнала в основном обусловлено изменениями сердечно-сосудистой системы.

Скорость и задержка роста ВРА. Критерием динамики ВРА в процессе терморелаксации является скорость роста этого параметра. Ожидается, что скорость роста ВРА может служить параметром вазомоторной реактивности сосудов испытуемого на изменение температуры. На рис. 3 представлена диаграмма средних значений скорости роста (V) ВРА (а) и времени задержки роста (τ) ВРА (б) для всех испытуемых; вертикальными отрезками указаны значения среднеквадратических отклонений. Значения V варьируются в зависимости от испытуемого, что свидетельствует о возможном влиянии иных факторов на скорость роста ВРА, помимо температуры.

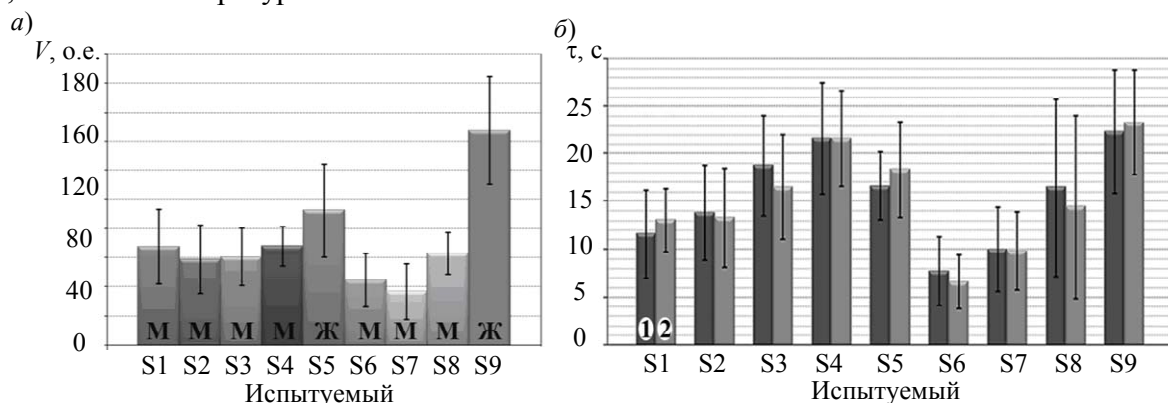


Рис. 3

Кроме того, установлено, что скорость роста ВРА коррелирует с временем задержки роста. Взаимосвязь этих параметров, вероятно, показывает, что они определяются работой вазомоторной системы. Как и скорость роста ВРА, время задержки PPG-сигнала является индивидуальным параметром, описывающим процесс терморелаксации, тогда как температура, при которой начинается увеличение PPG-сигнала, практически одинакова для всех испытуемых и составляет $15,9 \pm 0,4$ °С.

Заключение. В результате выполненных исследований установлено, что параметр ВРА может быть использован для описания физиологических процессов в живых тканях, связанных с изменением кровотока. Установлено также, что амплитуда пульсаций крови в охлажденной области ткани растет по мере увеличения температуры. Вариации значения ВРА малы для пальца с квазипостоянной температурой кожного покрова, тогда как в предварительно охлажденном пальце ВРА линейно растет и коррелирует с динамикой температуры кожи. Однако эта корреляция наблюдается не сразу после начала роста температуры кожного покрова, а с задержкой. Выявлено, что такая задержка является индивидуальной характеристикой каждого из испытуемых и изменяется в пределах от 6 до 29 с, положительно коррелируя со скоростью роста ВРА.

Таким образом, высокая детализация двумерного распределения амплитуды пульсаций крови, неинвазивность и оперативность метода визуализации пульсаций крови открывают возможность для разработки новой системы изучения физиологических процессов в живых тканях при изменении параметров кровотока.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 15-15-20012).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yamamoto-Suganuma R., Aso Y. Relationship between post-occlusive forearm skin reactive hyperaemia and vascular disease in patients with Type 2 diabetes—a novel index for detecting micro- and macrovascular dysfunction using laser Doppler flowmetry // *Diabetic Medicine*. 2009. Vol. 26. P. 83—88. DOI:10.1111/j.1464-5491.2008.02609.x.
2. Kurvers H. A. J. M., Jacobs M. J. H. M., Beuk R. J., van den Wildenberg F. A. J. M., Kitslaar P. J. E. H. M. et al. The spinal component to skin blood flow abnormalities in reflex sympathetic dystrophy // *Arch. Neurol*. 1996. Vol. 53. P. 58—65.
3. Draijer M., Hondebrink E., van Leeuwen T., Steenbergen W. Review of laser speckle contrast techniques for visualizing tissue perfusion // *Lasers Med. Sci*. 2009. Vol. 24. P. 639—651. DOI:10.1007/s10103-008-0626-3.
4. Takano C., Ohta Y. Heart rate measurement based on a time-lapse image // *Medical Eng. & Physics*. 2007. Vol. 29. P. 853—857. DOI:10.1016/j.medengphy.2006.09.006/
5. Kamal A. A. R., Harness J. B., Irving G., Mearns A. J. Skin photoplethysmography — A review // *Computer Methods and Programs in Biomedicine*. 1989. Vol. 28. P. 257—269.
6. Shelley K. H. Photoplethysmography: beyond the calculation of arterial oxygen saturation and heart rate // *Anesth. Analg*. 2007. Vol. 105. P. 31—S36. DOI: 10.1213/01.ane.0000269512.82836.c9.
7. Bandini A., Orlandi S., Manfredi C., Evangelisti A., Barrella M. et al. Effect of local blood flow in thermal regulation in diabetic patient // *Microvasc. Res*. 2013. Vol. 88. P. 42—47. DOI: org/10.1016/j.mvr.2013.03.005.
8. Roustit M., Blaise S., Millet C., Cracowski J. L. Reproducibility and methodological issues of skin post-occlusive and thermal hyperemia assessed by single-point laser Doppler flowmetry // *Microvasc. Res*. 2010. Vol. 79. P. 102—108. DOI:10.1016/j.mvr.2010.01.001.
9. Daly S. M., Leahy M. J. “Go with the flow”: A review of methods and advancements in blood flow imaging // *J. Biophotonics*. 2013. Vol. 6. P. 217—255. DOI:10.1002/jbio.201200071.
10. Kamshilin A. A., Miridonov S. V., Teplov V. Y., Saarenheimo R., Nippolainen E. Photoplethysmographic imaging of high spatial resolution // *Biomed. Opt. Express*. 2011. Vol. 2. P. 996—1006.
11. Kamshilin A. A., Mamontov O. V., Koval V. T., Zayats G. A., Romashko R. V. Influence of a skin status on the light interaction with dermis // *Biomed. Opt. Express*. 2015. Vol. 6. P. 4326—4334. DOI: 10.1364/BOE.6.004326.

12. 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. P.10494. DOI:10.1038/srep10494.
13. Sidorov I. S., Volynsky M. A., Kamshilin A. A. Influence of polarization filtration on the information readout from pulsating blood vessels // *Biomed. Opt. Express*. 2016. Vol. 7. P. 2469—2474. DOI:10.1364/BOE.7.002469.
14. Teplov V., Nippolainen E., Makarenko A. A., Giniatullin R., Kamshilin A. A. Ambiguity of mapping the relative phase of blood pulsations // *Biomed. Opt. Express*. 2014. Vol. 5. P. 3123—3139. DOI: 10.1364/BOE.5.003123.
15. Kyriacou P. A., Shafqat K., Pal S. K. Pilot investigation of photoplethysmographic signals and blood oxygen saturation values during blood pressure cuff-induced hypoperfusion // *Measurement*. 2012. Vol. 42. P. 1001—1005. DOI:10.1016/j.measurement.2009.02.005.

Сведения об авторах

- Анжелика Вадимовна Белавенцева** — Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, отдел оптоэлектронных методов исследования газообразных и конденсированных сред; инженер; E-mail: ange202@mail.ru
- Юрий Николаевич Кульчин** — д-р физ.-мат. наук, профессор; Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, отдел оптоэлектронных методов исследования газообразных и конденсированных сред; Дальневосточный федеральный университет; директор; E-mail: director@iacp.dvo.ru
- Роман Владимирович Ромашко** — д-р физ.-мат. наук, профессор; Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, отдел оптоэлектронных методов исследования газообразных и конденсированных сред; Дальневосточный федеральный университет; ведущий научный сотрудник; E-mail: romashko@iacp.dvo.ru
- Татьяна Станиславовна Запорожец** — д-р мед. наук, профессор; НИИ эпидемиологии и микробиологии им. Г. П. Сомова; зам. директора по научной работе; E-mail: niiem_vl@mail.ru
- Елена Викторовна Персиянова** — канд. биол. наук; НИИ эпидемиологии и микробиологии им. Г. П. Сомова, лаборатория иммунологии; ст. научный сотрудник; E-mail: Helen-pers@yandex.ru
- Людмила Павловна Ляхова** — канд. физ.-мат. наук, доцент; Дальневосточный федеральный университет, кафедра общей и экспериментальной физики
- Алексей Александрович Камшилин** — д-р физ.-мат. наук, профессор; Университет ИТМО, кафедра компьютерной фотоники и видеоинформатики; ст. научный сотрудник; E-mail: alexei.kamshilin@yandex.ru

Поступила в редакцию
18.10.18 г.

Ссылка для цитирования: Белавенцева А. В., Кульчин Ю. Н., Ромашко Р. В., Запорожец Т. С., Персиянова Е. В., Ляхова Л. П., Камшилин А. А. Диагностика физиологических процессов в живых тканях методом оптической визуализации пульсаций крови // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2019. Т. 62, № 3. С. 266—271.

DIAGNOSTICS OF PHYSIOLOGICAL PROCESSES IN LIVING TISSUES BY THE METHOD OF OPTICAL VISUALIZATION OF BLOOD PULSATION

A. V. Belaventseva¹, Yu. N. Kulchin^{1,2}, R. V. Romashko^{1,2}, T. S. Zaporozhets³,
E. V. Persyanova³, L. P. Lyakhova², A. A. Kamshilin⁴

¹*Institute of Automation and Control Processes, of Far Eastern Branch of the RAS,
690041, Vladivostok, Russia
E-mail: romashko@iacp.dvo.ru*

²*Far Eastern Federal University, 690091, Vladivostok, Russia*

³*G. P. Somov Scientific Research Institute of Epidemiology and Microbiology, 690028, Vladivostok, Russia*

⁴*ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia*

The possibility of using visualization of blood pulsations for studying processes of thermal relaxation in human living tissues is investigated. The blood pulsation amplitude (BPA) in a tissue is experimentally demonstrated to depend on thermal effect on the tissue: cooling a tissue leads to a drop in BPA, and

the process of heating a tissue is accompanied by its growth. The increase in the BPA rate is shown to be an individual characteristic of the subject, and therefore can serve as a parameter of vasomotor reactivity of vessels with temperature changes.

Keywords: microcirculation, thermoregulation, photoplethysmography, blood pulsations, perfusion of blood

REFERENCES

1. Yamamoto-Suganuma R. and Aso Y. *Diabetic Medicine*, 2009, vol. 26, pp. 83–88. DOI:10.1111/j.1464-5491.2008.02609.x.
2. Kurvers H.A.J.M., Jacobs M.J.H.M., Beuk R. J., van den Wildenberg F.A.J.M., Kitslaar P.J.E.H.M. et al. *Arch. Neurol.*, 1996, vol. 53, pp. 58–65.
3. Draijer M., Hondebrink E., van Leeuwen T. and Steenbergen W. *Lasers Med. Sci.*, 2009, vol. 24, pp. 639–651. DOI:10.1007/s10103-008-0626-3.
4. Takano C. and Ohta Y. *Med. Eng. Phys.*, 2007, vol. 29, pp. 853–857. DOI:10.1016/j.medengphy.2006.09.006.
5. Kamal A.A.R., Harness J.B., Irving G. and Mearns A.J. *Comput. Methods, Programs Biomed.*, 1989, vol. 28, pp. 257–269.
6. Shelley K.H. *Anesth. Analg.*, 2007, vol. 105, pp. 31–36. DOI: 10.1213/01.ane.0000269512.82836.c9.
7. Bandini A., Orlandi S., Manfredi C., Evangelisti A., Barrella M. et al. *Microvasc. Res.*, 2013, vol. 88, pp. 42–47. DOI: org/10.1016/j.mvr.2013.03.005.
8. Roustit M., Blaise S., Millet C., Cracowski J.L. *Microvasc. Res.*, 2010, vol. 79, pp. 102–108. DOI:10.1016/j.mvr.2010.01.001.
9. Daly S.M., Leahy M.J. *J. Biophotonics*, 2013, vol. 6, pp. 217–255. DOI:10.1002/jbio.201200071.
10. Kamshilin A.A., Miridonov S.V., Teplov V.Y., Saarenheimo R. and Nippolainen E. *Biomed. Opt. Express*, 2011, vol. 2, pp. 996–1006.
11. Kamshilin A.A., Mamontov O.V., Koval V.T., Zayats G.A. and Romashko R.V. *Biomed. Opt. Express*, 2015, vol. 6, pp. 4326–4334. DOI: 10.1364/BOE.6.004326.
12. Kamshilin A.A., Nippolainen E., Sidorov I.S., Vasilev P.V., Erofeev N.P., Podolian N.P. and Romashko R.V. *Scientific reports*, 2015, vol. 5, p. 10494. DOI:10.1038/srep10494.
13. Sidorov I.S., Volynsky M.A. and Kamshilin A.A. *Biomed. Opt. Express*, 2016, vol. 7, pp. 2469–2474. DOI:10.1364/BOE.7.002469.
14. Teplov V., Nippolainen E., Makarenko A.A., Giniatullin R. and Kamshilin A.A. *Biomed. Opt. Express*, 2014, vol. 5, pp. 3123–3139. DOI: 10.1364/BOE.5.003123.
15. Kyriacou P.A., Shafqat K., Pal S.K. *Measurement*, 2012, vol. 42, pp. 1001–1005. DOI:10.1016/j.measurement.2009.02.005.

Data on authors

- Angelica V. Belaventseva** — Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of the RAS, Department of Optoelectronic Methods of Investigating Gaseous and Condenses Media; Engineer; E-mail: ange202@mail.ru
- Yuriy N. Kulchin** — Dr. Sci., Professor; Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of the RAS, Department of Optoelectronic Methods of Investigating Gaseous and Condenses Media; Far Eastern Federal University; Director; E-mail: director@iacp.dvo.ru
- Roman V. Romashko** — Dr. Sci., Professor; Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of the RAS, Department of Optoelectronic Methods of Investigating Gaseous and Condenses Media; Far Eastern Federal University; Leading Researcher; E-mail: romashko@iacp.dvo.ru
- Tatyana S. Zaporozhets** — Dr. Sci., Professor; G. P. Somov Scientific Research Institute of Epidemiology and Microbiology; Deputy Director for Scientific Work; E-mail: niem_vl@mail.ru
- Elena V. Persiyanova** — PhD; G. P. Somov Scientific Research Institute of Epidemiology and Microbiology, Laboratory of Immunology; Senior Scientist; E-mail: Helen-pers@yandex.ru
- Lyudmila P. Lyakhova** — PhD, Associate Professor; Far Eastern Federal University, Department of General and Experimental Physics
- Alexey A. Kamshilin** — Dr. Sci., Professor; ITMO University, Department of Computer Photonics and Video-informatics; Senior Scientist; E-mail: alexei.kamshilin@yandex.ru

For citation: Belaventseva A.V., Kulchin Yu. N., Romashko R. V., Zaporozhets T. S., Persiyanova E. V., Lyakhova L. P., Kamshilin A. A. Diagnostics of physiological processes in living tissues by the method of optical visualization of blood pulsation. *Journal of Instrument Engineering*. 2019. Vol. 62, N 3. P. 266–271 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-3-266-271