

doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-5-795-800

УДК 57.087.3:612.146

Оценка кровоснабжения мозга через интактный череп с использованием визуализирующей фотоплетизмографии

Максим Александрович Волынский¹✉, Алексей Юрьевич Соколов²,
Никита Борисович Маргарянц³, Анастасия Витальевна Осипчук⁴,
Валерий Викторович Зайцев⁵, Олег Викторович Мамонтов⁶,
Алексей Александрович Камшилин⁷

^{1,3} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

^{1,5,6,7} Институт автоматизации и проблем управления Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, 690041, Российская Федерация

^{2,4} Институт фармакологии им. А.В. Вальдмана, Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И.П. Павлова, Санкт-Петербург, 197022, Российская Федерация

² Институт физиологии им. И.П. Павлова РАН, Санкт-Петербург, 199034, Российская Федерация

⁴ СПб ГКУЗ Медико-генетический центр, Санкт-Петербург, 194044, Российская Федерация

^{5,6,7} Национальный медицинский исследовательский центр им. В.А. Алмазова, Санкт-Петербург, 197341, Российская Федерация

¹ maxim.volynsky@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0003-1679-4450>

² alexey.y.sokolov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6141-486X>

³ nbmargaryants@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3767-3618>

⁴ osipchukanastasiia@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8903-7325>

⁵ zaytsevphoto@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3366-8376>

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

⁷ alexei.kamsilin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2506-9736>

Аннотация

Впервые продемонстрирована возможность оценки параметров церебральной гемодинамики без трепанации черепа с помощью метода визуализирующей фотоплетизмографии с освещением в ближней инфракрасной области спектра. Результаты получены при изучении изменения кровотока в головном мозге крысы в ответ на кратковременную остановку дыхания (апноэ-тест). Трансляция результатов в клиническую практику полезна для разработки методики неинвазивной оценки кровоснабжения мозга у лиц с цереброваскулярными заболеваниями.

Ключевые слова

визуализирующая фотоплетизмография, инфракрасное излучение, церебральный кровоток, апноэ-тест, эксперименты на животных

Ссылка для цитирования: Волынский М.А., Соколов А.Ю., Маргарянц Н.Б., Осипчук А.В., Зайцев В.В., Мамонтов О.В., Камшилин А.А. Оценка кровоснабжения мозга через интактный череп с использованием визуализирующей фотоплетизмографии // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. Т. 21, № 5. С. 795–800. doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-5-795-800

Assessment of cerebral circulation through an intact skull using imaging photoplethysmography

Maxim A. Volynsky¹✉, Alexey Y. Sokolov², Nikita B. Margaryants³,
Anastasiia V. Osipchuk⁴, Valery V. Zaytsev⁵, Oleg V. Mamontov⁶, Alexei A. Kamshilin⁷

^{1,3} ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

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

^{2,4} Valdman Institute of Pharmacology, Pavlov First St. Petersburg State Medical University of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Saint Petersburg, 199034, Russian Federation

² Pavlov Institute of Physiology, Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, 197022, Russian Federation

⁴ Medical Genetic Center, Saint Petersburg, 194044, Russian Federation

^{5,6,7} Almazov National Medical Research Centre, Saint Petersburg, 197341, Russian Federation

¹ maxim.volynsky@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0003-1679-4450>

² alexey.y.sokolov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6141-486X>

³ nbmargaryants@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3767-3618>

⁴ osipchukanastasiia@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8903-7325>

⁵ zaytsevphoto@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3366-8376>

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

⁷ alexei.kamshilin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2506-9736>

Abstract

The feasibility of assessing the parameters of cerebral hemodynamics without skull trepanation using imaging photoplethysmography with illumination in the near-infrared spectrum range was demonstrated for the first time. The results were obtained when studying changes in blood flow in the rat brain in response to short-term respiratory failure (apnea test). Translation of the results into clinical practice will be useful for the development of a method for non-invasive assessment of cerebral blood flow in patients with cerebrovascular diseases.

Keywords

imaging photoplethysmography, infrared radiation, cerebral blood flow, apnea test, animal model

For citation: Volynsky M.A., Sokolov A.Yu., Margaryants N.B., Osipchuk A.V., Zaytsev V.V., Mamontov O.V., Kamshilin A.A. Assessment of cerebral circulation through an intact skull using imaging photoplethysmography. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2021, vol. 21, no. 5, pp. 795–800 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-5-795-800

Неинвазивное исследование кровотока в головном мозге — актуальная задача в современной экспериментальной и клинической медицине [1, 2]. Существующие сегодня методы [1, 3–5] имеют ряд недостатков, основные из которых — низкое пространственное разрешение, высокая стоимость оборудования и его техническая сложность. В последнее десятилетие активно развивается методика визуализирующей фотоплетизмографии, отражающая пространственно-временные изменения локального кровенаполнения тканей вследствие сердечной деятельности. В зеленом свете [6–8] данная методика лишена перечисленных недостатков, однако глубина проникновения излучения позволяет исследовать церебральный кровоток лишь при вскрытии или истончении костей черепа. В то же время имеется ряд сравнительных исследований, рассматривающих возможность использования в фотоплетизмографии излучения в ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне длин волн [9]. В настоящей работе впервые продемонстрированы результаты изучения изменения кортикального кровотока мозга крысы в ответ на провокационный дыхательный тест с помощью визуализирующей фотоплетизмографии с ИК освещением.

Метод визуализирующей фотоплетизмографии основан на освещении исследуемой биоткани некогерентным излучением с неизменной во времени интенсивностью, модуляции интенсивности отраженного света вследствие его поглощения и рассеяния форменными

элементами крови и регистрации последовательности изображений области наблюдения.

Экспериментальная установка для визуализирующей фотоплетизмографии (рис. 1) включает монохромную цифровую видеокамеру (модель GigE uEye UI-5220SE, IDS, Германия) с формирующим изображением объективом (M1214-MP2, Computar, Япония) и осветительный блок из восьми светодиодов (TDS-P003IR-T3A-M1, TDS Lighting Co., Китай) на длине волны 750 ± 50 нм, расположенных вокруг объектива видеокамеры. Для повышения отношения сигнал-шум освещение объекта и регистрация видеоданных осуществляется через линейно-поляризующую пленку (Edmund Optics, США) с взаимно-ортогональной ориентацией направлений поляризации для осветителя и видеокамеры [10]. Для улучшения чувствительности видеокамеры к ближнему ИК диапазону длин волн, из нее удален встроенный ИК фильтр. Видеокадры с разрешением 752×480 пикселей зарегистрированы на частоте 100 кадр/с синхронно с записью электрокардиограммы на частоте 1 кГц с сохранением всех данных на жесткий диск персонального компьютера. Детальное аналогичная установка была описана ранее в наших предыдущих работах [6, 7].

Эксперимент выполнен на одной взрослой крысе (самец) линии Вистар массой 490 г. Условия содержания животного и его использования в исследовании соответствовали этическим принципам, изложенным в

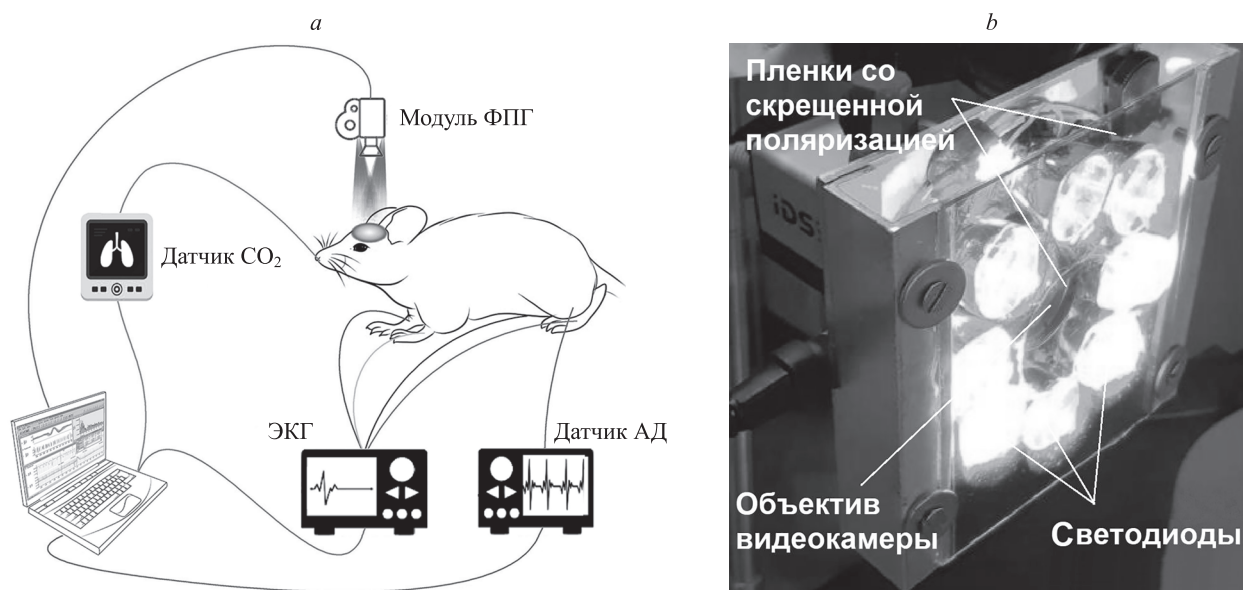


Рис. 1. Схема эксперимента (а) и фотография модуля визуализирующей фотоплетизмографии (ФПГ) (b). АД — артериальное кровяное давление, ЭКГ — электрокардиограф, CO₂ — углекислый газ

Fig. 1. Layout of the experiment (a) and photograph of the imaging photoplethysmographic (PPG) module (b). АД (ABP) — arterial blood pressure, ЭКГ (ECG) — electrocardiograph, CO₂ — carbonic acid gas

Директиве 2010/63/EU¹. Подготовка животного включала наркотизацию, трахеостомию, канюлирование бедренных артерий и вены, фиксацию в стереотаксе, удаление мягких тканей с теменной кости черепа и перевод на искусственную вентиляцию легких. В процессе эксперимента производился постоянный контроль электрокардиограммы, мониторинг системного артериального давления и концентрации углекислого газа в выдыхаемом воздухе. Детальное описание манипуляций с лабораторным животным описано, например, в работе [7], с тем различием, что в настоящей работе кости черепа не подвергались хирургическим воздействиям.

Опыт продолжался в течение 180 с. Первые 30 с наблюдалось исходное состояние животного, далее на 30 с производилось отключение аппарата искусственной вентиляции легких (апноэ-тест), после чего аппарат вновь включался и оценивалось восстановление физиологических параметров в течении 120 с.

Обработка данных фотоплетизмографии осуществлялась с помощью оригинального программного обеспечения с получением двух параметров: амплитуды пульсационного компонента сигнала фотоплетизмографии, ассоциирующейся с сосудистым тонусом, и оптического внутреннего сигнала, отражающего общее кровенаполнение тканей. Описание алгоритма обработки данных и получаемых параметров сигнала фотоплетизмографии приведено в работе [8].

¹ DIRECTIVE 2010/63/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 22 September 2010 on the protection of animals used for scientific purposes // Official Journal of the European Union. 20 October 2010. V. L 276. P. 33–79. doi: 10.3000/17252555.L_2010.276.eng

На рис. 2 представлены графики изменения физиологических параметров животного во время эксперимента. Видно, что в ответ на временное отключение дыхания происходит резкий подъем артериального давления, двукратное увеличение амплитуды пульсационной компоненты фотоплетизмографического сигнала и примерно четырехкратное увеличение оптического внутреннего сигнала. Однако после восстановления вентиляции легких артериальное давление и амплитуда пульсационного компонента весьма быстро возвращаются к исходному уровню, в то время как оптический внутренний сигнал, хоть и снижается, но остается стабильно повышенным, что, возможно, говорит о развитии отека мозга.

На рис. 3 показаны примеры пространственных распределений оптического внутреннего сигнала до отключения дыхания и во время него. Видно, что хорошо заметны области с различным кровенаполнением, что демонстрирует возможность пространственной визуализации параметров кровотока при видеозаписи через интактный череп. Приведенный пример показывает, что нет необходимости формирования сфокусированного на исследуемом объекте (т. е. головном мозге) оптического изображения.

Полученные нами результаты впервые демонстрируют новые возможности метода фотоплетизмографии в ИК диапазоне, позволяющего проводить неинвазивную оценку церебрального кровотока, что может быть полезно как в экспериментальной медицине, так и в клинической практике, и определяет целесообразность дальнейшей разработки соответствующего оборудования.

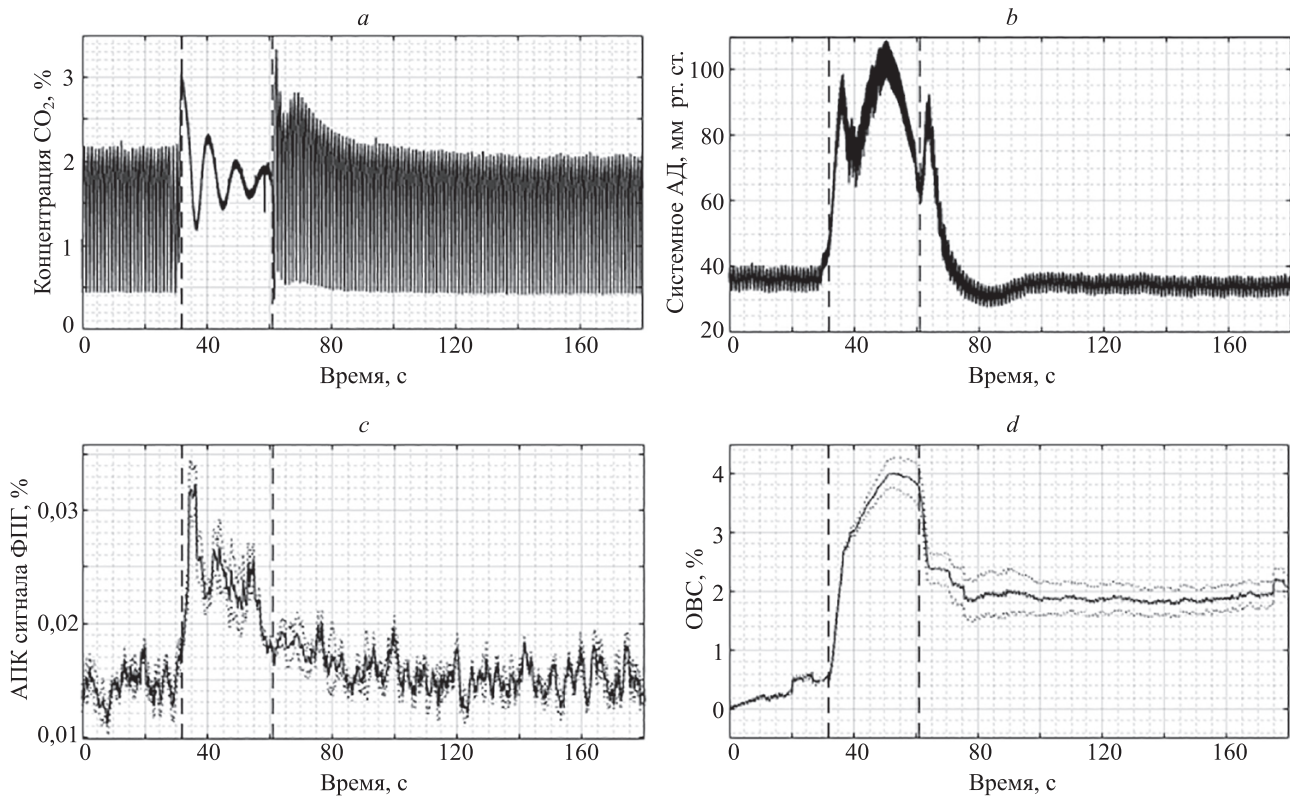


Рис. 2. Динамика изменения концентрации углекислого газа (CO_2) в выдыхаемом воздухе (а), системного артериального давления (АД) (b), амплитуды пульсационного компонента (АПК) сигнала фотоплетизмографии (ФПГ) (с) и оптического внутреннего сигнала (ОВС) (d) в процессе эксперимента. Вертикальными пунктирными линиями обозначен период апноэ-теста. На (с) и (d) штриховыми кривыми показаны стандартные отклонения

Fig. 2. Dynamics of changes in carbonic acid gas (CO_2) concentration (a), systemic arterial blood pressure (ABP) (b), amplitude of the pulsatile component (APC) of the photoplethysmographic (PPG) waveform (c), and slowly varying component of the PPG waveform (d) during the experiment. The vertical dashed lines indicate the period of the apnea test. In (c) and (d) panels, the dotted curves show the standard deviations

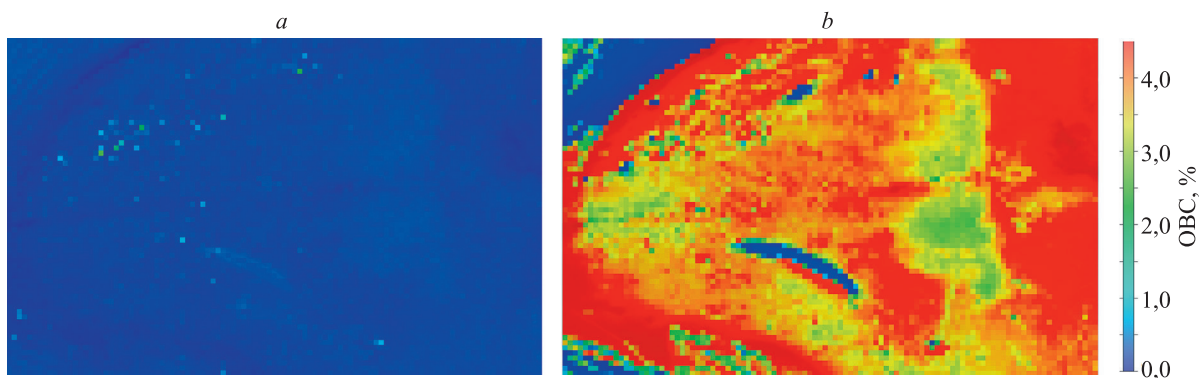


Рис. 3. Карты пространственного распределения оптического внутреннего сигнала (ОВС) на 20 с (a) и 50 с (b) эксперимента. Размеры изображений $16,3 \times 10,4 \text{ мм}^2$, пространственное разрешение 65 мкм

Fig. 3. Spatial distribution of slowly varying component of the photoplethysmographic waveform for 20 s (a) and 50 s (b) of the experiment. Image size is $16.3 \times 10.4 \text{ mm}^2$, spatial resolution is 65 μm

Литература

1. Liu P., De Vis J.B., Lu H. Cerebrovascular reactivity (CVR) MRI with CO₂ challenge: A technical review // *Neuroimage*. 2019. V. 187. P. 104–115. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2018.03.047>
2. Urbach A.L., MacIntosh B.J., Goldstein B.I. Cerebrovascular reactivity measured by functional magnetic resonance imaging during breath-hold challenge: A systematic review // *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*. 2017. V. 79. P. 27–47. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2017.05.003>
3. Sleight E., Stringer M.S., Marshall J., Wardlaw J.M., Thrippleton M.J. Cerebrovascular reactivity measurement using magnetic resonance imaging: A systematic review // *Frontiers in Physiology*. 2021. V. 12. P. 643468. <https://doi.org/10.3389/fphys.2021.643468>
4. McDonnell M.N., Berry N.M., Cutting M.A., Keage H.A., Buckley J.D., Howe P.R.C. Transcranial Doppler ultrasound to assess cerebrovascular reactivity: reliability, reproducibility and effect of posture // *PeerJ*. 2013. N 1. P. e65. <https://doi.org/10.7717/peerj.65>
5. Steiger H.J., Aaslid R., Stooss R. Dynamic computed tomographic imaging of regional cerebral blood flow and blood volume: A clinical pilot study // *Stroke*. 1993. V. 24. N 4. P. 591–597. <https://doi.org/10.1161/01.str.24.4.591>
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. <https://doi.org/10.3389/fnins.2019.01235>
7. Mamontov O.V., Sokolov A.Y., Volynsky M.A., Osipchuk A.V., Zaytsev V.V., Romashko R.V., Kamshilin A.A. Animal model of assessing cerebrovascular functional reserve by imaging photoplethysmography // *Scientific Reports*. 2020. V. 10. N 1. P. 19008. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-75824-w>
8. Sokolov A.Y., Volynsky M.A., Zaytsev V.V., Osipchuk A.V., Kamshilin A.A. Advantages of imaging photoplethysmography for migraine modeling: new optical markers of trigemino-vascular activation in rats // *Journal of Headache and Pain*. 2021. V. 22. N 1. P. 18. <https://doi.org/10.1186/s10194-021-01226-6>
9. Sidorov I.S., Romashko R.V., Koval V.T., Giniatullin R., Kamshilin A.A. Origin of Infrared light modulation in reflectance-mode photoplethysmography // *PLoS ONE*. 2016. V. 11. N 10. P. e0165413. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0165413>
10. Sidorov I.S., Volynsky M.A., Kamshilin A.A. Influence of polarization filtration on the information readout from pulsating blood vessels // *Biomedical Optics Express*. 2016. V. 7. N 7. P. 2469–2474. <https://doi.org/10.1364/BOE.7.002469>

Авторы

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

Соколов Алексей Юрьевич — доктор медицинских наук, доцент, заведующий отделом, Институт фармакологии им. А.В. Вальдмана, Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И.П. Павлова, Санкт-Петербург, 197022, Российская Федерация; научный сотрудник, Институт физиологии им. И.П. Павлова РАН, Санкт-Петербург, 197022, Российская Федерация, [sc 15849563500](https://orcid.org/0000-0002-6141-486X), <https://orcid.org/0000-0002-6141-486X>, alexey.y.sokolov@gmail.com

Маргарянц Никита Борисович — кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 6507118169](https://orcid.org/0000-0002-3767-3618), <https://orcid.org/0000-0002-3767-3618>, nbmargaryants@itmo.ru

Осипчук Анастасия Витальевна — младший научный сотрудник, Институт фармакологии им. А.В. Вальдмана, Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И.П. Павлова, Санкт-Петербург, 197022, Российская Федерация; врач лабораторной диагностики, СПб ГКУЗ Медико-генетический центр, Санкт-Петербург, 194044, Российская Федерация, [sc 57195558135](https://orcid.org/0000-0001-8903-7325), <https://orcid.org/0000-0001-8903-7325>, osipchukanastasiia@gmail.com

References

1. Liu P., De Vis J.B., Lu H. Cerebrovascular reactivity (CVR) MRI with CO₂ challenge: A technical review. *Neuroimage*, 2019, vol. 187, pp. 104–115. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2018.03.047>
2. Urbach A.L., MacIntosh B.J., Goldstein B.I. Cerebrovascular reactivity measured by functional magnetic resonance imaging during breath-hold challenge: A systematic review. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 2017, vol. 79, pp. 27–47. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2017.05.003>
3. Sleight E., Stringer M.S., Marshall J., Wardlaw J.M., Thrippleton M.J. Cerebrovascular reactivity measurement using magnetic resonance imaging: A systematic review. *Frontiers in Physiology*, 2021, vol. 12, pp. 643468. <https://doi.org/10.3389/fphys.2021.643468>
4. McDonnell M.N., Berry N.M., Cutting M.A., Keage H.A., Buckley J.D., Howe P.R.C. Transcranial Doppler ultrasound to assess cerebrovascular reactivity: reliability, reproducibility and effect of posture. *PeerJ*, 2013, no. 1, pp. e65. <https://doi.org/10.7717/peerj.65>
5. Steiger H.J., Aaslid R., Stooss R. Dynamic computed tomographic imaging of regional cerebral blood flow and blood volume: A clinical pilot study. *Stroke*, 1993, vol. 24, no. 4, pp. 591–597. <https://doi.org/10.1161/01.str.24.4.591>
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, vol. 13, pp. 1235. <https://doi.org/10.3389/fnins.2019.01235>
7. Mamontov O.V., Sokolov A.Y., Volynsky M.A., Osipchuk A.V., Zaytsev V.V., Romashko R.V., Kamshilin A.A. Animal model of assessing cerebrovascular functional reserve by imaging photoplethysmography. *Scientific Reports*, 2020, vol. 10, no. 1, pp. 19008. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-75824-w>
8. Sokolov A.Y., Volynsky M.A., Zaytsev V.V., Osipchuk A.V., Kamshilin A.A. Advantages of imaging photoplethysmography for migraine modeling: new optical markers of trigemino-vascular activation in rats. *Journal of Headache and Pain*, 2021, vol. 22, no. 1, pp. 18. <https://doi.org/10.1186/s10194-021-01226-6>
9. Sidorov I.S., Romashko R.V., Koval V.T., Giniatullin R., Kamshilin A.A. Origin of Infrared light modulation in reflectance-mode photoplethysmography. *PLoS ONE*, 2016, vol. 11, no. 10, pp. e0165413. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0165413>
10. Sidorov I.S., Volynsky M.A., Kamshilin A.A. Influence of polarization filtration on the information readout from pulsating blood vessels. *Biomedical Optics Express*, 2016, vol. 7, no. 7, pp. 2469–2474. <https://doi.org/10.1364/BOE.7.002469>

Authors

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

Alexey Y. Sokolov — MD, PhD, D.Sc., Associate Professor, Head of Department, Valdman Institute of Pharmacology, Academician I.P. Pavlov First St. Petersburg State Medical University of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Saint Petersburg, 197022, Russian Federation; Scientific Researcher, Pavlov Institute of Physiology, Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, 197022, Russian Federation, [sc 15849563500](https://orcid.org/0000-0002-6141-486X), <https://orcid.org/0000-0002-6141-486X>, alexey.y.sokolov@gmail.com

Nikita B. Margaryants — PhD, Associate Professor, Senior Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 6507118169](https://orcid.org/0000-0002-3767-3618), <https://orcid.org/0000-0002-3767-3618>, nbmargaryants@itmo.ru

Anastasiia V. Osipchuk — MD, Junior Researcher, Valdman Institute of Pharmacology, Academician I.P. Pavlov First St. Petersburg State Medical University of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Saint Petersburg, 197022, Russian Federation; Laboratory Diagnostics Doctor, Medical Genetic Center, Saint Petersburg, 194044, Russian Federation, [sc 57195558135](https://orcid.org/0000-0001-8903-7325), <https://orcid.org/0000-0001-8903-7325>, osipchukanastasiia@gmail.com

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

Мамонтов Олег Викторович — доктор медицинских наук, научный сотрудник, Национальный медицинский исследовательский центр им. В.А. Алмазова, Санкт-Петербург, 197341, Российская Федерация; ведущий научный сотрудник, Институт автоматки и проблем управления Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, 690041, Российская Федерация, [sc 6505846605](https://orcid.org/0000-0003-3063-439X), <https://orcid.org/0000-0003-3063-439X>, mamontoffoleg@gmail.com

Камшилин Алексей Александрович — доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник, Институт автоматки и проблем управления Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, 690041, Российская Федерация; ведущий научный сотрудник, Национальный медицинский исследовательский центр им. В.А. Алмазова, Санкт-Петербург, 197341, Российская Федерация, [sc 7007138092](https://orcid.org/0000-0003-2506-9736), <https://orcid.org/0000-0003-2506-9736>, alexei.kamsilin@yandex.ru

Valery V. Zaytsev — Engineer, Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Vladivostok, 690041, Russian Federation; 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

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

Alexei A. Kamshilin — D.Sc., Senior Researcher, Chief Researcher, Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Vladivostok, 690041, Russian Federation; Leading Researcher, Almazov National Medical Research Centre, Saint Petersburg, 197341, Russian Federation, [sc 7007138092](https://orcid.org/0000-0003-2506-9736), <https://orcid.org/0000-0003-2506-9736>, alexei.kamsilin@yandex.ru

*Статья поступила в редакцию 18.08.2021
Одобрена после рецензирования 23.08.2021
Принята к печати 17.09.2021*

*Received 18.08.2021
Approved after reviewing 23.08.2021
Accepted 17.09.2021*



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»