



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-8-14-20>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 535.36, 612.15

СИСТЕМА ОЦЕНКИ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ КРОВОТОКА В ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЯХ КОЖНЫХ ПОКРОВОВ ПО СПЕКЛ-СТРУКТУРЕ МНОГОКРАТНО РАССЕЯННОГО ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

АБРАМОВИЧ Н.Д.^{1,2}, ДИК С.К.¹

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)

²Унитарное предприятие «Научно-технический центр «ЛЭМТ» БелОМО»
(г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 10 ноября 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. Оценка параметров микроциркуляции кожных покровов является актуальной и важной задачей современной медицины при разработке методов диагностики заболеваний нервной системы. Усовершенствована система оценки функционального состояния кровотока в верхних слоях кожи в диапазоне длин волн от 400 до 850 нм на основе использования расширенной математической модели распространения оптического излучения в коже человека за счет учета дополнительных параметров: оптической анизотропии кожного покрова, диаметра и формы эритроцитов в слое дермы, артериального давления крови в плечевой артерии в диапазоне от 90/60 до 195/130 мм рт. ст., концентрации белков плазмы в крови (α_1 , α_2 , β_1 , β_2 , γ -глобулинов и фибриногена, г/л), реологических свойств течения крови при диаметре кровеносных сосудов от 4,5 до 500 мкм в поверхностных слоях кожи, температуры кожных покровов от +35 до +41 °С. Разработанная система позволяет определить выраженность микрогемодинамических сдвигов во взаимосвязи с метаболическими нарушениями, улучшить диагностику и оценить эффективность лечения ряда заболеваний нервной системы, сократить время обследования пациента и повысить точность измерения параметров микроциркуляции кровотока на 10 % (линейной и объемной скоростей кровотока) для выявления нарушений кровотока в поверхностных слоях кожи в норме и при патологии нервной системы человека.

Ключевые слова: система, кожа, биофизические и структурные параметры, кровь, контраст, когерентное излучение, спекл-структура.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Выражаем благодарность сотрудникам лаборатории клинической патофизиологии нервной системы ГУ «РНПЦ неврологии и нейрохирургии» г. Минска.

Для цитирования. Абрамович Н.Д., Дик С.К. Система оценки функционального состояния кровотока в поверхностных слоях кожных покровов по спекл-структуре многократно рассеянного оптического излучения. Доклады БГУИР. 2020; 18(8): 14-20.

A SYSTEM FOR ASSESSING THE FUNCTIONAL STATE OF BLOOD FLOW IN THE SKIN SURFACE LAYERS BY THE SPECKLE STRUCTURE OF MULTIPLY SCATTERED OPTICAL RADIATION

NIKOLAI D. ABRAMOVICH^{1,2}, SERGEI K. DICK¹

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

²Unitary enterprise "Scientific and technical center "LEMT" BelOMO" (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 10 November 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. Assessment of the parameters of skin microcirculation is an urgent and important task of modern medicine in the development of methods for diagnosing diseases of the nervous system. The system for assessing the functional state of blood flow in the skin surface layers in the wavelength range from 400 to 850 nm has been improved based on the use of an extended mathematical model of the propagation of optical radiation in human skin by taking into account additional parameters: optical anisotropy of the skin, diameter and shape of erythrocytes in the dermis layer, blood pressure in the brachial artery in the range from 90/60 to 195/130 mm·Hg, plasma protein concentration in the blood (α_1 , α_2 , β_1 , β_2 , γ -globulins and fibrinogen, g/l), rheological properties of blood flow with a diameter of blood vessels from 4.5 to 500 microns in the skin surface layers, skin temperature from +35 to +41 °C. The developed system makes it possible to determine the severity of microhemodynamic shifts in relation to metabolic disorders, improve diagnosis and evaluate the treatment efficacy of a number of neurological disorders; it also made it possible to reduce the patient examination time and increase the accuracy of measuring the blood flow microcirculation parameters by 10 % (linear and volumetric blood flow velocities) to detect blood flow disturbances in the surface layers of the skin in the normal and abnormal condition of the nervous system.

Keywords: system, skin, biophysical and structural parameters, blood, contrast, coherent radiation, speckle structure.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

Gratitude. We would like to express our gratitude to the staff of the Clinical Pathophysiology of the Nervous System Laboratory of the "Republican Scientific Practical Center of Neurology and Neurosurgery" State Institution in Minsk.

For citation. Abramovich N.D., Dick S.K. A system for assessing the functional state of blood flow in the skin surface layers by the speckle structure of multiply scattered optical radiation. Doklady BGUIR. 2020; 18(8): 14-20.

Введение

Нормальное функционирование органов и организма в целом определяется состоянием поверхностного кровотока в коже человека. Оценка параметров микроциркуляции поверхностных биотканей является важнейшей задачей современной медицины в части диагностики целого ряда заболеваний сердечно-сосудистой и дыхательной систем, болезней кожи и т. д. В настоящее время установлены некоторые особенности микроциркуляции в кожных покровах, которые можно контролировать с помощью когерентного оптического излучения. На основе изучения закономерностей, связанных с взаимодействием когерентного оптического излучения с кожными покровами, в зависимости от изменения контраста спекл-пятен от биофизических параметров кожи, можно значительно повысить точность оценки состояния и выявить нарушения микроциркуляции в кожных покровах при патологии различных органов человека (заболевания нервной системы, транзиторная ишемическая атака, кожные заболевания и т. д.). Для оценки микроциркуляции существует ряд средств медицинского назначения, которые позволяют оценить параметры функционального состояния кровотока (аппарат спектрофотометрии «Спектротест», лазерные доплеровские флоуметры,

лазерный анализатор микроциркуляции крови «ЛАКК», капилляроскопы и т. д.), однако погрешность контроля при этом составляет от 30 до 50 %, что обусловлено неточностью установки положения осветительного датчика, отсутствием контроля давления осветительного датчика на кожу, упрощенной моделью (физико-математической) распространения когерентного излучения оптического диапазона в коже. При этом результат измерения интерпретируется человеком, что приводит к субъективности в оценке функционального состояния кровотока. В связи с этим разработана усовершенствованная система оценки функционального состояния микроциркуляции кровотока на основе расширенной математической модели распространения оптического излучения в коже является актуальной научно-практической задачей, решение которой важно при создании диагностических систем нового поколения для лечебно-профилактических учреждений Республики Беларусь, прежде всего, для клиницистов-практиков.

Описание системы

Структурная схема усовершенствованной системы оценки функционального состояния кровотока в поверхностных слоях кожных покровов представлена на рис. 1.

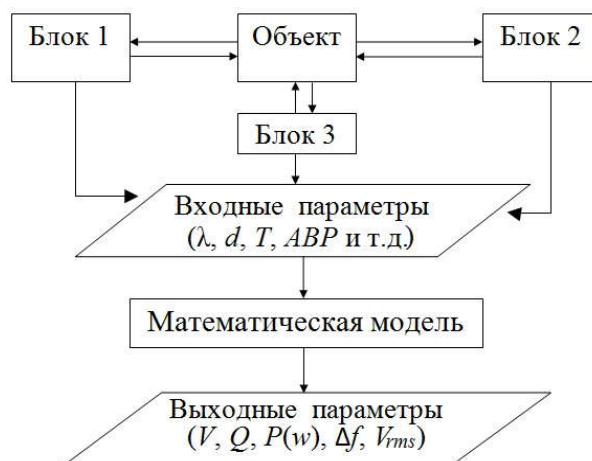


Рис. 1. Структурная схема системы оценки функционального состояния кровотока
Fig. 1. Block diagram of the system for assessing the functional state of blood flow

Блок 1 представляет собой лазерный анализатор «Speckle-Scan». С помощью этого анализатора проводится мониторинг состояния кровотока в каждом покрове, регистрация и измерение в относительных единицах флуктуаций интенсивности спекл-поля, образующегося в процессе рассеяния диффузными объектами когерентного оптического излучения. Блок 2 представлен высокочастотным ультразвуковым доплерографом «Минимакс Допплер - К», который используется для измерения диаметра просвечиваемого кровеносного сосуда. Блок 3 представляет собой измеритель артериального давления серии ИАД – 01 «Адьютор», который предназначен для неинвазивного измерения артериального давления у пациента.

На основе входных данных, поступающих в математическую модель, проводится обработка поступающей информации, определение показателей функционального состояния кровотока в поверхностных слоях кожных покровов.

На основе многолетних исследований и наблюдений была расширена математическая модель процесса распространения когерентного оптического излучения в многослойной биоткани: зависимостей контраста спекл-пятен от биофизических и структурных параметров биоткани [1, 2]. Учет реологических особенностей течения крови позволил лучше представить процессы распространения оптического излучения в коже человека [3–8].

Входными параметрами математической модели являются: длина волны λ источника когерентного оптического излучения (диапазон от 400 до 850 нм); толщина рогового слоя $d_0 = 20$ мкм, эпидермиса $d_1 = 100$ мкм и дермы d_2 (рассматривался как полубесконечный,

в оптическом плане, слой); биофизические параметры кожи – объемные концентрации (доли объема, занимаемые соответствующим хромофором) капилляров в слое дермы C_b и меланина в эпидермисе C_m , а также степень оксигенации крови S (отношение концентрации оксигемоглобина к общему гемоглобину) (рис. 2). Вклад указанных выше слоев кожи в процессы поглощения и рассеяния излучения различен. Спектральные зависимости оптических параметров кожи, используемые в модели, получены после критического анализа, отбора и усреднения результатов различных авторов.

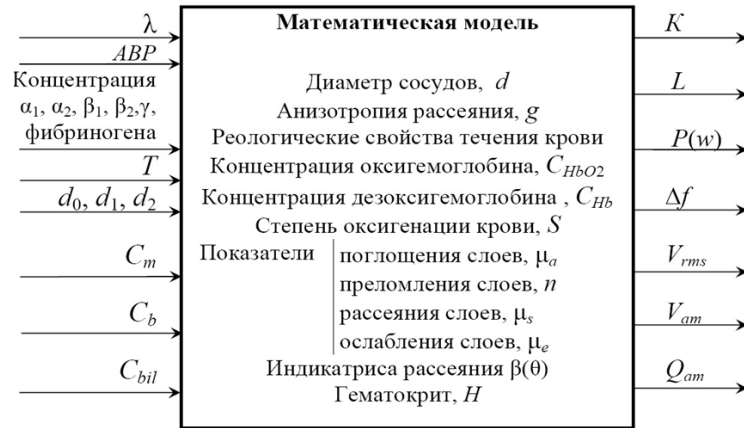


Рис. 2. Входные и выходные параметры математической модели
Fig. 2. Input and output parameters of the mathematical model

Математическая модель дополнительно учитывает оптическую анизотропию кожного покрова в виде среднего значения косинуса угла рассеяния излучения, значение которого изменяется в пределах от -1 до 1 (значению -1 соответствует случай полного отражения излучения от поверхности кожного покрова, значению 0 – изотропное, т. е. Релеевское рассеяние на мелких частицах, значению 1 – рассеяние Ми на крупных частицах), диаметр (от 6 до 9 мкм) и форму (сферу, диск) эритроцитов в слое дермы, артериальное давление крови в плечевой артерии в диапазоне от $90/60$ до $195/130$ мм рт. ст., концентрацию белков плазмы в крови (α_1 , α_2 , β_1 , β_2 , γ -глобулинов и фибриногена, г/л), реологические свойства течения крови (зависимость гематокрита и вязкости крови от диаметра кровеносного сосуда, наличие слоя плазмы без эритроцитов у стенки сосуда, затупленный профиль скорости течения крови по сравнению с профилем течения Пуазейля) при диаметре кровеносных сосудов от $4,5$ до 500 мкм в поверхностных слоях кожи [9, 10], температуру кожных покровов от $+35$ до $+41$ °C, что позволяет получить распределение когерентной и флуктуирующей составляющих [4, 5] рассеянного в кожных покровах светового поля, сопоставить параметры спекл-поля от различных характеристик кожных покровов для селективного воздействия когерентного оптического излучения на кожу.

Основу для моделирования составляют многокомпонентный метод ТПИ (индикатриса рассеяния представляется в виде суммы функций, которые имеют различные угловые масштабы), связь между теорией когерентности светового поля в рассеивающей среде и инженерными формулами ТПИ, используя преобразование Фурье. Это позволило определить необходимые фотометрические характеристики рассеянного оптического излучения и разделить суммарное излучение на когерентное и флуктуирующее. В модели рассчитываются показатели преломления по отношению к окружающему веществу, показатели поглощения μ_a , рассеяния μ_s и ослабления μ_e в каждом из слоев, индикатрисы рассеяния или их интегральные параметры. Используемые показатели зависят как от длины волны излучения, так и объемных концентраций меланина в эпидермисе и гемоглобина крови [3, 4, 7].

Выходными параметрами системы оценки функционального состояния кровотока в поверхностных слоях кожи являются контраст K и размеры $L_{i,j}$ спекл-пятен, линейная V и объемная Q скорости кровотока в поверхностных слоях кожных покровов. Диапазоны вариаций модельных параметров для патологически измененной и нормальной кожи указаны в табл. 1.

Таблица 1. Диапазоны вариаций модельных параметров
Table 1. Ranges of variation of model parameters

Параметр Parameter	Диапазон Range	Параметр Parameter	Диапазон Range	Параметр Parameter	Диапазон Range
d_0 , роговой слой, мкм	0 – 20	λ , нм	400 – 850	C_{a1} , г/л	1,3 – 5,3
d_1 , эпидермис, мкм	100 – 400	T , °С	+35 – +41	C_{a2} , г/л	5,1 – 13
d_2 , дерма, мм	0,12 – 5	S , %	40 – 97	$C_{\beta 1}$, г/л	1,3 – 3,6
d , мкм	4,5 – 500	C_m , %	1 – 16	$C_{\beta 2}$, г/л	0,6 – 1,21
ABP , мм рт. ст	90/60 – 195/130	C_b , %	1 – 16	C_γ , г/л	3,3 – 17
d_s , мкм	6 – 9	g	-1 – 1	C_{fib} , г/л	1 – 10
$L_{i,j}$, мм	10^{-4} – 1	K	0 – 1	C_{bil} , мг/л	0,1 – 50
Q , мл/мин	0,01 – 0,06	H , %	30 – 55	V , см/с	0,1 – 4,0

Также установлены интегральные параметры оценки состояния кровотока в условиях действия различных вазоактивных факторов (влияющих на тонус и диаметр просвета кровеносных сосудов): мощность спектра, средняя частота спектра, среднеквадратическая скорость движущихся частиц [9, 10]. С помощью разработанной системы можно оценить кровотоки в поверхностных слоях кожи в норме и при патологии нервной системы человека, сократить время обследования пациента и повысить точность измерения параметров микроциркуляции кровотока на 10 % (линейной скорости кровотока от 0,1 до 4,0 см/с и объемной скорости кровотока от 0,01 до 0,06 мл/мин).

Заключение

Усовершенствованная система оценки функционального состояния кровотока в поверхностных слоях кожи внедрена в лаборатории клинической патофизиологии нервной системы ГУ «РНПЦ неврологии и нейрохирургии», г. Минск, Республика Беларусь, в 2020 году в клиническую практику. Данная система позволила определить выраженность микрогемодинамических и метаболических нарушений, улучшить диагностику и оценить эффективность лечения ряда заболеваний, позволила сократить время обследования пациента на 20 минут (относительно флоуриметрических методов) и повысить точность измерения параметров микроциркуляции кровотока на 10 % при выявлении нарушений кровотока в поверхностных слоях кожи в норме и при патологии нервной системы человека за счет учета интегральных параметров (мощности спектра, средней частоты спектра, среднеквадратической скорости движущихся частиц [9, 10]) оценки состояния кровотока в условиях действия различных вазоактивных (влияющих на тонус и диаметр просвета кровеносных сосудов) факторов, что подтверждено результатами совместных исследований по теме НИР «Разработать и внедрить метод диагностики и лечения пациентов с преходящими транзиторными церебральными ишемическими приступами (атаками) на фоне хронической ишемии головного мозга» (сроки выполнения 2017–2019 гг.) № ГР 20171422 от 04.08.2017 г. в рамках утвержденной постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 25 февраля 2016 г. № 153 государственной научно-технической программы «Новые методы оказания медицинской помощи», подпрограммы «Внутренние болезни».

Список литературы

1. Абрамович, Н.Д., Дик С.К. Зависимость размеров спекл-пятен и их контраста от биофизических и структурных параметров биоткани. *Приборы и методы измерений*. 2017;8(2):177-187. DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-2-177-187.
2. Abramovich N.D., Dick S.K., Sontea V.P. Speckle pattern of radiation scattered of soft biological tissues. Light fields outside tissue. *Journal of technical university of Moldova and moldavian engineering association*. 2016;(4):32-36.
3. Дик С.К. *Лазерно-оптические методы и технические средства контроля функционального состояния биообъектов*. Минск: БГУИР; 2014.

4. Барун В.В., Дик С.К., Иванов А.П., Абрамович Н.Д. Моделирование структуры светового спекл-поля внутри многослойной ткани кожи человека. *Инженерно-физический журнал*. 2013;86(6):1288-1295. DOI: 10.1007/s10891-013-0962-4.
5. Зеге Э.П., Кацев И.Л., Иванов А.П. *Перенос изображения в рассеивающей среде*. Минск: Наука и техника; 1985.
6. Ван де Хюлст Г. *Рассеяние света малыми частицами*. Москва: Изд-во иностр. литературы; 1961.
7. Иванов А.П., Кацев И.Л. О спекл-структуре светового поля в дисперсной среде, освещенной лазерным пучком. *Квантовая Электроника*. 2005;35(7):670-674.
8. Тучин В.В. *Оптика биологических тканей: методы рассеяния света в медицинской диагностике*. Москва: Физматлит; 2013.
9. Абрамович Н.Д., Дик С.К., Василевская Л.А., Хлудеев И.И. Оценка функционального состояния кожной микрогемодинамики методами доплеровской флоуметрии и спекл-метрии. *Доклады БГУИР*. 2019;121(3):5-11. DOI: 10.35596/1729-7648-2019-123-5-5-11.
10. Abramovich N.D., Dick S.K., Vasilevska L.A., Khludayev I.I., Sontea V.P. Methods for assessing the state of microhemocirculation of biotissue by speckle-structure of multiple scattered radiation. *Journal of Engineering Sciences*. 2018;XXV(3):52-60. DOI: 10.5281/zenodo.2557298.

References

1. Abramovich N.D., Dik S.K. [Zavisimost razmerov speckl-pyaten i ih contrasta ot biophizicheskikh i strukturnykh parametrov biontani]. *Pribory i metody izmerenii*. 2017;8(2):177-187. DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-2-177-187. (In Russ.)
2. Abramovich N.D., Dick S.K., Sontea V.P. Speckle pattern of radiation scattered of soft biological tissues. Light fields outside tissue. *Journal of technical university of Moldova and moldavian engineering association*. 2016;(4):32-36.
3. Dik S.K. [*Lazerno-opticheskiye metody i tekhnicheskkiye sredstva kontrolya funktsional'nogo sostoyaniya bioob'yektov*]. Minsk: BSUIR; 2014. (In Russ.)
4. Barun V.V., Dik S.K., Ivanov A.P., Abramovich N.D. [Modelirovaniye struktury svetovogo spekl-polya vnutri mnogoslnoynoy tkani kozhi cheloveka]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal*. 2013;86(6):1288-1295. DOI: 10.1007/s10891-013-0962-4. (In Russ.)
5. Zege E.P., Katsev I.L., Ivanov A.P. [*Perenos izobrazheniya v rasseivayushchey srede*]. Minsk: Nauka i tekhnika; 1985. (In Russ.)
6. Van de Khyulst G. [*Rasseyaniye sveta malymi chastitsami*]. Moskva: Izd-vo inostr. literatury; 1961. (In Russ.)
7. Ivanov A.P., Katsev I.L. [O spekl-strukture svetovogo polya v dispersnoy srede, osveshchennoy lazernym puchkom.]. *Kvantovaya Elektronika*. 2005;35(7):670-674. (In Russ.)
8. Tuchin V.V. [*Optika biologicheskikh tkaney: metody rasseyaniya sveta v meditsinskoj diagnostike*]. Moscow: Fizmatlit; 2013. (In Russ.)
9. Abramovich N.D., Dik S.K., Vasilevska L.A., Khludayev I.I. [Ocenka funktsionalnogo sostoyaniya kozhnoi mikrohemodinamiki metodami dopplerovskoi floymetrii i spekl-metrii]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2019;121(3):5-11. DOI: 10.35596/1729-7648-2019-123-5-5-11. (In Russ.)
10. Abramovich N.D., Dick S.K., Vasilevska L.A., Khludayev I.I., Sontea V.P. Methods for assessing the state of microhemocirculation of biotissue by speckle-structure of multiple scattered radiation *Journal of Engineering Sciences*. 2018;XXV(3):52-60. DOI: 10.5281/zenodo.2557298.

Вклад авторов

Абрамович Н.Д. обосновал необходимость и провел разработку усовершенствованной системы оценки функционального состояния кровотока, систематизировал полученные результаты, подготовил текст статьи.

Дик С.К. определил цель исследований, провел обсуждение полученных результатов.

Authors' contribution

Abramovich N.D. substantiated the necessity and developed an improved system for assessing the functional state of blood flow, systematized the obtained results and prepared the article text.

Dick S.K. determined the purpose of research, conducted the results discussion.

Сведения об авторах

Абрамович Н.Д., магистр технических наук, заместитель начальника отдела электроники оптико-электронных приборов Научно-технического центра «ЛЭМТ» БелОМО.

Дик С.К., к.ф.-м.н., доцент, депутат Палаты представителей Национального собрания.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-33-314-94-38;
e-mail: fitix@yandex.ru
Абрамович Николай Дмитриевич

Information about the authors

Abramovich N.D., Master of Engineering Sciences, Deputy Head of the Electronics Department of Optical-Electronic Devices of Scientific and technical center "LEMT" BelOMO.

Dick S.K., PhD, Associate Professor, Member of the House of Representatives of the National Assembly.

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +375-33-314-94-38;
e-mail: fitix@yandex.ru
Abramovich Nikolai Dmitrievich