

---

---

**ПРИБОРОСТРОЕНИЕ ДЛЯ БИОЛОГИИ  
И МЕДИЦИНЫ**

---

---

УДК 53.084.2

© А. Ю. Зайцева, Ю. Я. Кисляков, М. С. Мазинг, В. В. Давыдов, 2020

**ПРИМЕНЕНИЕ НЕИНВАЗИВНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ОБУЧАЕМОЙ  
ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ И МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ  
АНАЛИЗА МНОГОМЕРНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ОЦЕНКИ  
КИСЛОРОДНОГО СТАТУСА ТКАНЕЙ ЧЕЛОВЕКА  
(КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ)**

Предложен неинвазивный метод анализа кислородного обеспечения тканей человека с применением методов математической обработки многомерных данных, имеющий важное диагностическое значение. В результате экспериментальных исследований с участием 10 испытуемых при помощи неинвазивной оптической обучаемой диагностической системы были проведены измерения с целью получения массива информации в условных единицах многоканального оптического анализатора видимого диапазона спектров. Полученные результаты математической обработки экспериментальных данных показывают, что предложенная методика является эффективной и может найти применение в практической медико-биологической экспресс-диагностике.

*Кл. сл.:* оптическая система, мультисенсорные системы, оценка функционального состояния, неинвазивный метод диагностики

**ВВЕДЕНИЕ**

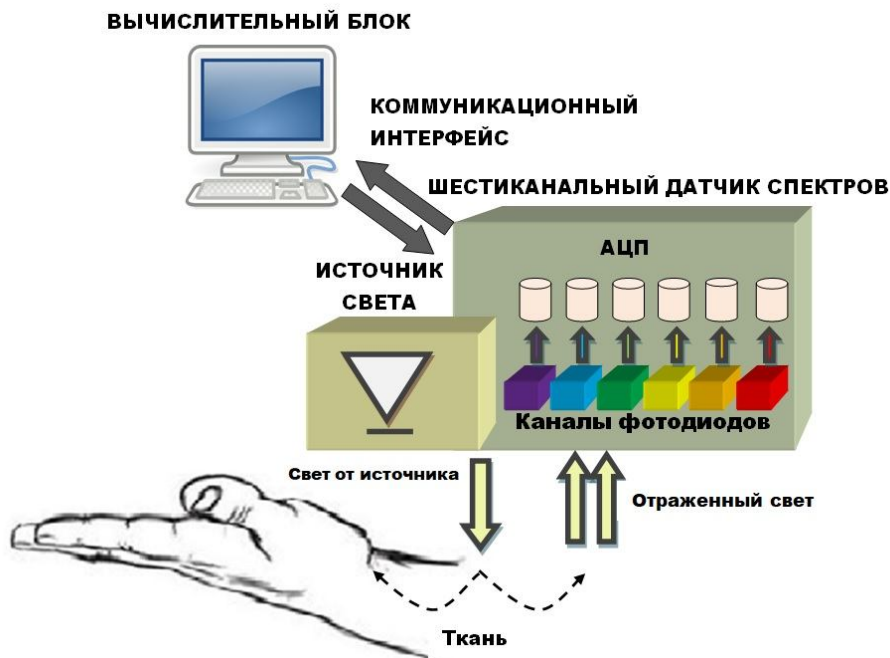
В настоящее время особо бурное развитие получили различные методы медико-биологической экспресс-диагностики [1–4]. В этой связи постоянно поднимается вопрос о применении неинвазивных систем, основанных на методе спектроскопии для оценки общего функционального состояния организма в экспресс-режиме. Также рассматривается возможность использования данных систем для диагностики широкого круга заболеваний человека на ранней стадии [5–7]. Последнее крайне актуально; так, многие приборы, например основанные на явлении ядерного магнитного резонанса, могут использоваться только в стационарных помещениях или специализированных машинах [8, 9]. Особый практический интерес представляют собой неинвазивные приборы, работающие по методологии абсорбционной спектроскопии на основе разных оптических свойств оксигенированных и дезоксигенированных фракций гемоглобина. Приборы такого класса позволяют безопасно и безболезненно определять насыщение гемоглобина кислородом в тканях организма, не повреждая кожный покров испытуемого [10, 11]. Как известно, в тканях человека содержится большой объем информации о состоянии его здоровья [12, 13], но тем не менее довольно часто различные оптические методы не всегда позволяют точно оценить общее функциональное состоя-

ние человека [14, 15]. Таким образом, задача разработки оптической неинвазивной диагностической системы, особенно для индивидуального использования, является крайне актуальной.

**МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ**

Разрабатываемая диагностическая система представлена комплексной оптической системой, состоящей из приемной оптико-электронной части, системы сбора и компьютерного модуля обработки данных. Функциональная блок-схема неинвазивной оптической обучаемой диагностической системы представлена на рис. 1.

Оптико-электронный модуль основан на шестиканальном интегральном оптическом анализаторе спектров видимого диапазона, датчики которого являются чувствительными к основным физиологическим формам гемоглобина. Микросхема шестиканального оптического анализатора спектра объединяет необходимые компоненты для спектрального анализа: шестиканальный оптический датчик, аналогово-цифровые преобразователи и коммуникационный интерфейс для связи с внешним микроконтроллером. Шестиканальный датчик работает на длинах волн 450 / 500 / 550 / 570 / 600 / 650 нм; помимо этого, каждый канал содержит гауссовский фильтр, обеспечивающий полуширину пропускания излучения 40 нм.



**Рис. 1.** Функциональная блок-схема неинвазивной оптической обучаемой диагностической системы

Информационно-вычислительный модуль оптической системы осуществляет общее управление, обработку полученного массива данных с использованием статистических алгоритмов анализа многомерных данных (в том числе алгоритмов машинного обучения) и визуализацию образов.

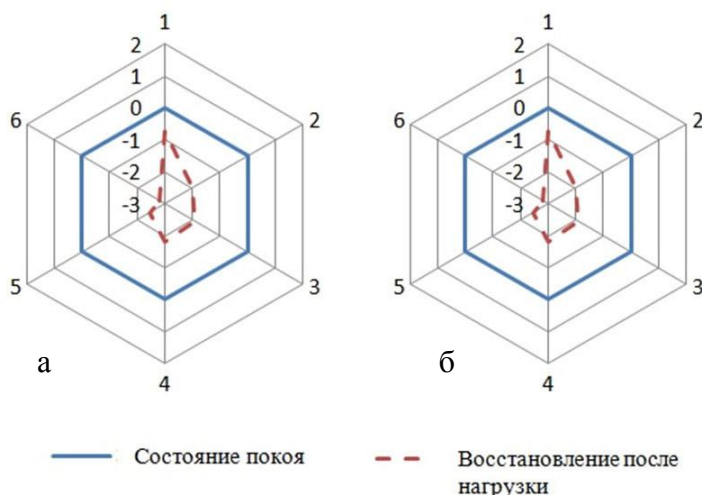
Экспериментальные исследования с применением разрабатываемой оптической системы с целью оценки ее работоспособности были проведены у 10 пациентов (5 человек — средний возраст 25 лет, и 5 человек — средний возраст 60) для отслеживания динамики кислородного статуса при выполнении функциональной нагрузки, представляющей собой задержку дыхания на максимально возможное время. Функциональные нагрузки, основанные на задержке дыхания, традиционно используются в медико-биологических исследованиях в качестве теста для оценки устойчивости организма к экстремальным условиям недостатка кислорода, при этом характер наблюдаемых изменений конкретной функции после нагрузки сопоставляется с ее значением в состоянии покоя. Каждый испытуемый во время эксперимента находился в положении сидя, диагностическая система была установлена на кисти левой руки с отсутствием возможности сдвига сенсорного модуля относительно первоначального места его установки

в течение всех периодов эксперимента для максимальной минимизации погрешности измерений. Зарегистрированные показания шести сенсоров в разные периоды эксперимента (состояние покоя, момент возобновления дыхания после задержки, период восстановления) заносились в таблицу, которая представляет собой массив численных значений сенсоров в условных единицах, относительное изменение которых, отражает компенсаторно-адаптационную реакцию организма испытуемых на функциональную нагрузку.

Все процедуры, выполняемые в исследованиях с участием испытуемых, соответствовали этическим стандартам институционального и / или национального исследовательского комитета, а также Хельсинкской декларации 1964 г. и более поздним поправкам к ней или сопоставимым этическим стандартам.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

По полученным табличным значениям для каждого испытуемого были построены цифровые "образы", представляющие собой радиальные диаграммы, каждая из которых является многоугольником с шестью углами и с шестью лучами,

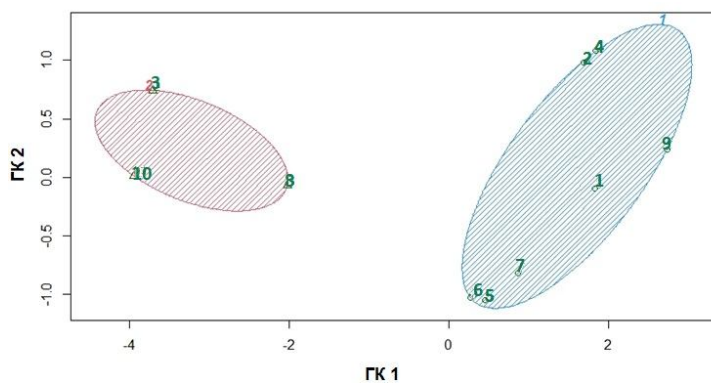


**Рис. 2.** Усредненные нормированные изображения кислородного статуса тканей двух групп испытуемых (а, б)

выходящими из общего центра к вершинам углов геометрической фигуры. Каждый луч является осью, вдоль которой откладывается показание каждого из шести датчиков в условных единицах в определенный взятый для анализа момент времени проведенного эксперимента (состояние покоя, начало задержки дыхания, окончание задержки и возобновление дыхания, период восстановления). Данные композиции значений представляют собой цифровые "образы" испытуемых, отражающие статус кислородного обеспечения тканей, а динамика изменения "образа" в течение функциональной нагрузки характеризует различную компенсаторно-адаптивную реакцию организма на гипоксическое воздействие. По полученным результатам все испытуемые были разделены на 2 группы, каждая из которых существенно отличается определенной тенденцией изменения "образа"

испытуемых после функциональной нагрузки. Усредненные нормализованные образы относительно состояния покоя для двух групп представлены на рис. 2.

Помимо этого, результаты измерений были проанализированы с помощью алгоритма кластеризации k-средних с предварительной нормировкой переменных. Визуализация полученных кластеров осуществлялась с применением метода главных компонент. Многомерные статистические алгоритмы анализа данных были проведены с целью уменьшения размерности переменных и объединения полученных образов испытуемых в непересекающиеся группы. Результат кластеризации образов испытуемых методом k-средних в двумерном пространстве искусственных двух главных компонент представлен на рис. 3.



**Рис. 3.** Результат кластеризации методом k-средних кислородных образов 10 испытуемых в пространстве двух главных компонент.

Изображения образов найдены методом главных компонент по 6 признакам, представляющим собой численные показания каждого из шести датчиков после функциональной нагрузки, нормированные относительно значений, полученных в состоянии покоя. По оси "х" отложена первая главная компонента, а по оси "у" вторая главная компонента

По результатам анализа многомерных данных можно сделать вывод о том, что у каждого испытуемого имеется разная адаптационная реакция организма на функциональную нагрузку. Помимо того, прослеживается разделение между испытуемыми и их объединение в два кластера. Внутри каждого кластера располагаются сходные между собой кислородные образы испытуемых, что позволяет выделить две отличные друг от друга группы с однородной компенсаторно-восстановительной реакцией организма на нагрузку. Результаты эксперимента, представляющие собой предрасположенность испытуемых к группам с различной компенсаторно-восстановительной реакцией организма, были подтверждены независимым медико-биологическим исследованием.

Таким образом, полученные данные проведенного исследования подтверждают возможность применения разрабатываемого оптического метода анализа кислородного обеспечения тканей в определении компенсаторно-восстановительной реакции организма человека, которая характеризует функциональное состояние сердечно-сосудистой и дыхательной систем организма, а также общее функциональное состояние человека. Исследование требует увеличения размера выборки (не менее 100 испытуемых) для проведения более полного факторного анализа статистических данных с последующим обучением диагностической оптической системы.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты свидетельствуют об эффективности разрабатываемого метода контроля кислородного обеспечения тканей человека. Дальнейшие исследования будут направлены на расширение возможностей по получению данных, выявлению корреляционных зависимостей с целью создания обучаемой неинвазивной оптической диагностической системы, способной к распознаванию компенсаторно-восстановительной реакции организма.

*Исследование выполнено в рамках Государственного задания № 075-01073-20-00 по теме "Микрофлюидные устройства и системы для имитации и исследования процессов в живом организме", СУ НИИР 0074-2019-0010.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Grevtseva A.S., Davydov V.V., Rud' V.Yu. Development of methods for results reliability raise during the diagnosis of

- a person's condition by pulse oximeter // Journal Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1135, no. 1. 012056.
2. Kislyakov Yu.Ya., Avdyushenko S.A., Kislyakova L.P., Zaitceva A.Yu. Analytical multisensory trainable system for diagnosing vocational aptitude of military medical specialists by ion content in the expired breath condensate // Journal of Computational and Theoretical Nanoscience. 2019. Vol. 16, no. 11. P. 4502–4507. DOI: 10.1166/jctn.2019.8343
3. Kislyakova L.P., Kislyakov Yu.Ya., Zaitceva A.Yu., Gulyaev V.I. Мультисенсорная система "Электронный язык" для контроля функционального состояния организма по электрохимическим показателям жидких сред // В мире научных открытий. 2014. №. 2. С. 406–412.
4. Golpe R., Jiménez A., Carpizo R., Cifrian J.M. Utility of home oximetry as a screening test for patients with moderate to severe symptoms of obstructive sleep apnea // Sleep. 1999. Vol. 22, no. 7. P. 932–937.
5. Yu H., Liu B. Successful use of pharyngeal pulse oximetry with the oropharyngeal airway in severely shocked patients // Anaesthesia. 2007. Vol. 62, no. 7. P. 734–736.
6. Grevtseva A.S., Davydov V.V., Greshnevnikov K.V., Rud' V.Yu., Glinushkin A.P. Method of assessment the degree of reliability of the pulse wave image in the rapid diagnosis of the human condition // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1368, no. 2. 022072.
7. Davydov R.V., Mazing M.S., Yushkova V.V., Stirmanov A.V., Rud' V.Yu. A new method for monitoring the health condition based on nondestructive signals of laser radiation absorption and scattering // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1410, no. 1. 012067.
8. Neronov Y.I., Kosenkov D.D. Development of an NMR relaxometer for determining magnetization dynamics of water protons in living tissues and its use for evaluating age-related changes // Technical Physics. 2019. Vol. 64, no. 7. P. 1055–1059.
9. Абдурахманов А.Р. Ядерно-магнитный резонанс. МРТ // Физика и медицина: создавая будущее. Сб. Самара: НИЦ LJournal, 2018. С. 115–118.
10. Kelleher J.F. Pulse oximetry // Journal of clinical monitoring. 1989. Т. 5, № 1. С. 37–62.
11. Лемдясов Ю.Л., Латыпов А.Ф., Нафикова Р.М., Саянова Л.Р. Пульсоксиметрия как метод неинвазивного измерения сатурации крови // Биотехнические, медицинские и экологические системы и комплексы. Биомедсистемы-2016. Сб. Рязань, 2016. С. 104–107.
12. Симонян М.А., Посненкова О.М., Киселев А.Р. Возможности фотоплетизмографии как метода скрининга патологии сердечно-сосудистой системы // КардиоИТ. 2020. Т. 7, вып. 1. DOI: 10.15275/cardioit.2020.0102
13. Тучин В.В. Исследование биотканей методами светорассеяния // Успехи физических наук. 1997. Т. 167, № 5. С. 517–539.

14. Перминов А.С., Юран С.И. Проектирование оптоэлектронных датчиков с устранением влияния артефактов // Вестник ИжГТУ им. М.Т. Калашникова. 2010. № 3. С. 102–105.
15. Davydov R.V., Antonov V.I., Yushkova V.V., Grebenikova N.M., Dudkin V.I. A new algorithm for processing the absorption and scattering signals of laser radiation on a blood vessel and human tissues // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1236, no. 1. 012079.

**Всероссийский научно-исследовательский институт фитопатологии, Московская обл. (Давыдов В.В.)**

Контакты: Зайцева Анна Юрьевна,  
anna@da-24.ru

**Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург (Зайцева А.Ю., Кисляков Ю.Я., Мазинг М.С.)**

Материал поступил в редакцию 16.10.2020

**Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (Мазинг М.С., Давыдов В.В.)**

## APPLICATION OF NON-INVASIVE OPTICAL TRAINABLE DIAGNOSTIC SYSTEM AND MATHEMATICAL METHODS OF PROCESSING MULTIDIMENSIONAL DATA TO ASSESS THE OXYGEN STATUS OF HUMAN TISSUES (SHORT DESCRIPTION)

**A. Yu. Zaitceva<sup>1</sup>, Yu. Ya. Kislyakov<sup>1</sup>, M. S. Mazing<sup>1,2</sup>, V. V. Davydov<sup>2,3</sup>**

<sup>1</sup>*Institute for Analytical Instrumentation of RAS, Saint Petersburg, Russia*

<sup>2</sup>*Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Russia*

<sup>3</sup>*Department of Ecology, Russian Research Institute for Phytopathology, Moscow Region, Odintsovo*

A non-invasive method for analyzing oxygen supply for human tissues using methods of mathematical processing of multidimensional data, which has an important diagnostic value, is proposed. As a result of experimental studies with the participation of 10 subjects using a non-invasive optical trainable diagnostic system, attempts were made to collect information in conventional units by means of multichannel optical analyzer of the visible spectral range. The obtained results of mathematical processing of experimental data show that the proposed technique is effective and can be used in practical medical and biological developments.

*Keywords:* optical system, multisensor systems, functional state assessment, non-invasive diagnostic method

### REFERENCES

1. Grevtseva A.S., Davydov V.V., Rud' V.Yu. Development of methods for results reliability raise during the diagnosis of a person's condition by pulse oximeter. *Journal Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1135, no. 1. 012056. DOI: 10.1088/1742-6596/1135/1/012056
2. Kislyakov Yu.Ya., Avdyushenko S.A., Kislyakova L.P., Zaitceva A.Yu. Analytical multisensory trainable system for diagnosing vocational aptitude of military medical specialists by ion content in the expired breath condensate. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, 2019, vol. 16, no. 11, pp. 4502–4507. DOI: 10.1166/jctn.2019.8343

3. Kislyakova, L.P., Kislyakov Yu.Ya., Zaiceva A.Yu., Gulyaev V.I. [Multisensory system "Electronic tongue" for control of body state according to the electrochemical indicators of biological fluids]. *V mire nauchnyh otkrytij* [Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture], 2014, no. 2, pp. 406–412. DOI: 10.12731/wsd-2014-2-406-412 (In Russ.).
4. Golpe R., Jiménez A., Carpizo R., Cifrian J.M. Utility of home oximetry as a screening test for patients with moderate to severe symptoms of obstructive sleep apnea. *Sleep*, 1999, vol. 22, no. 7, pp. 932–937.
5. Yu H., Liu B. Successful use of pharyngeal pulse oximetry with the oropharyngeal airway in severely shocked patients. *Anaesthesia*, 2007, vol. 62, no. 7, pp. 734–736. DOI: 10.1111/j.1365-2044.2007.05072.x
6. Grevtseva A.S., Davydov V.V., Greshnevikov K.V., Rud' V.Yu., Glinushkin A.P. Method of assessment the degree of reliability of the pulse wave image in the rapid diagnosis of the human condition. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1368, no. 2. 022072. DOI: 10.1088/1742-6596/1368/2/022072
7. Davydov R.V., Mazing M.S., Yushkova V.V., Stirmanov A.V., Rud' V.Yu. A new method for monitoring the health condition based on nondestructive signals of laser radiation absorption and scattering. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1410, no. 1. 012067. DOI: 10.1088/1742-6596/1410/1/012067
8. Neronov Y.I., Kosenkov D.D. Development of an NMR relaxometer for determining magnetization dynamics of water protons in living tissues and its use for evaluating age-related changes. *Technical Physics*, 2019, vol. 64, no. 7, pp. 1055–1059. DOI: 10.1134/S106378421907017X
9. Abdurahmanov A.R. [Nuclear magnetic resonance. MRI]. *Fizika i medicina: sozdavaya budushchee. Sb. Samara: NIC LJournal* [Physics and medicine: creating the future. Samara: NIC LJournal], 2018, pp. 115–118. (In Russ.).
10. Kelleher J.F. Pulse oximetry. *Journal of clinical monitoring*, 1989, vol. 5, no. 1, pp. 37–62. DOI: 10.1007/BF01618369
11. Lemdyasov Yu.L., Latypov A.F., Nafikova R.M., Sayapova L.R. [Pulsoximetry as a method for non-invasive measurement of blood saturation]. *Biotekhnicheskie, medicinskie i ekologicheskie sistemy i komplekсы. Biomedistemy-2016. Sb. Ryazan* [Biotechnical, medical and environmental systems and complexes. Biomedical systems-2016. Ryazan], 2016, pp. 104–107. (In Russ.).
12. Simonyan M.A., Posnenkova O.M., Kiselev A.R. [Capabilities of photoplethysmography as a method for screening of cardiovascular system pathology]. *Kardio-IT* [Cardio-IT], 2020, vol. 7, is. 1. (In Russ.). DOI: 10.15275/cardioit.2020.0102
13. Tuchin V.V. [Light scattering study of tissues]. *Physics-Uspokhi* [Advances in Physical Sciences], 1997, vol. 167, no. 5, pp. 517–539. (In Russ.). DOI: 10.3367/UFNr.0167.199705c.0517
14. Perminov A.S., Yuran S.I. [Designing Optoelectronic Sensors with Elimination of Artefacts Influence]. *Vestnik IzhGTU im. M.T. Kalashnikova* [Bulletin of IzhGTU named M.T. Kalashnikov], 2010, no. 3, pp. 102–105. (In Russ.). URL: <https://istu.ru/storage/documents/izdat/vestnik/2010-3.pdf>
15. Davydov R.V., Antonov V.I., Yushkova V.V., Grebenikova N.M., Dudkin V.I. A new algorithm for processing the absorption and scattering signals of laser radiation on a blood vessel and human tissues. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1236, no. 1. 012079. DOI: 10.1088/1742-6596/1236/1/012079

Contacts: Zaitceva Anna Yur'evna,  
anna@da-24.ru

Article received by the editorial office on 16.10.2020