

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-07-121-131

УДК 57.087

Анализ данных медико-биологических мультисенсорных оптических систем

МАРИЯ СЕРГЕЕВНА МАЗИНГ¹✉, АННА ЮРЬЕВНА ЗАЙЦЕВА²,
ЛЕВ ВАСИЛЬЕВИЧ НОВИКОВ³

Институт аналитического приборостроения Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

¹mazmari@mail.ru <https://orcid.org/0000-0003-1739-9671>

²anna@da-24.ru <https://orcid.org/0000-0003-0334-2770>

³novik38@mail.ru <https://orcid.org/0009-0001-6930-8762>

Аннотация

Предмет исследования. Мультисенсорные оптические системы, предназначенные для медико-биологических исследований, и методология применения мультисенсорного подхода в оптической биомедицинской диагностике. **Цель работы.** Разработка и детальное исследование многоканальной оптической системы, предназначенной для сбора, передачи и последующего анализа диагностической информации, а также разработка эффективного алгоритма предварительной обработки большого объема оптических сигналов, описывающих состояние биологического объекта, с использованием методов интеллектуального анализа данных. **Метод.** Методы интеллектуального анализа многомерных данных в применении к мультисенсорному подходу ранжирования сигналов оптической спектроскопии. **Основные результаты.** Представлена малогабаритная оптическая мультисенсорная система для биомедицинской диагностики, включающая массив из 18 фотодиодных чувствительных элементов, имеющих селективную чувствительность в видимом и инфракрасном диапазонах оптического излучения на длинах волн от 410 до 940 нм. Описаны этапы анализа многомерной информации, получаемой от системы, в которых предлагается использование метода главных компонент и алгоритмов кластерного анализа. Проведено экспериментальное исследование с участием испытуемых, которое подтвердило эффективность предложенных подходов. Методами интеллектуального анализа данных проведена визуализация результатов ранжирования испытуемых, которая позволила выявить скрытые закономерности в функциональном состоянии микроциркуляторно-тканевых систем по показаниям массива оптических сенсоров. **Практическая значимость.** Результаты проведенных исследований могут быть использованы при проектировании автоматизированных комплексов на основе оптических мультисенсорных систем для решения задач идентификации и анализа функционального состояния сложных многокомпонентных биологических тканей и жидкостей организма человека.

Ключевые слова: мультисенсорная оптическая система, оптическая спектроскопия, интеллектуальный анализ данных, метод главных компонент

Благодарность: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 24-21-00404).

Ссылка для цитирования: Мазинг М.С., Зайцева А.Ю., Новиков Л.В. Анализ данных медико-биологических мультисенсорных оптических систем // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 7. С. 121–131. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-07-121-131>

Коды OCIS: 170.3880, 170.1470, 170.4580

Analysis of data from biomedical multisensor optical systems

MARIA S. MAZING¹✉, ANNA YU. ZAITCEVA², LEV V. NOVIKOV³

Institute of Analytical Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

¹mazmari@mail.ru <https://orcid.org/0000-0003-1739-9671>

²anna@da-24.ru <https://orcid.org/0000-0003-0334-2770>

³novik38@mail.ru <https://orcid.org/0009-0001-6930-8762>

Abstract

Subject of study. Multisensor optical systems intended for biomedical research, and the methodology for applying the multisensor approach in optical biomedical diagnostics. **The aim of study.** Development and detailed study of a multichannel optical system designed for collecting, transmitting and subsequent analysis of diagnostic information, as well as the development of an effective algorithm for preprocessing a large volume of optical signals describing the state of a biological object, using data mining methods. **Method.** Methods for mining multidimensional data as applied to a multisensory approach to ranking optical spectroscopy signals. **Main results.** A small-sized optical multisensor system for biomedical diagnostics is presented, which includes an array of 18 photodiode sensitive elements with selective sensitivity to the visible and infrared ranges of optical radiation at wavelengths from 410 to 940 nm. The stages of analysis of multidimensional information received from the system are described, in which the use of the principal component method and cluster analysis algorithms is proposed. An experimental study was conducted with the participation of subjects, which confirmed the effectiveness of the proposed approaches. Using data mining methods, the results of ranking the subjects were visualized, which made it possible to identify hidden patterns in the functional state of microcirculatory tissue systems according to the readings of an array of optical sensors. **Practical significance.** The results of the research can be used in the design of automated complexes based on optical multisensor systems to solve problems of identification and analysis of the functional state of complex multicomponent biological tissues and fluids of the human body.

Keywords: multisensor optical system, optical spectroscopy, data mining, principal component analysis

Acknowledgment: this work was supported by the Russian Science Foundation, project № 24-21-00404.

For citation: Mazing M.S., Zaitseva A.Yu., Novikov L.V. Analysis of data from medical and biological multisensor optical systems [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2024. V. 91. № 7. P. 121–131. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-07-121-131>

OCIS codes: 170.3880, 170.1470, 170.4580

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях весьма актуальны и представляют большой интерес исследования и разработки инновационных методов в области диагностики, профилактики и мониторинга различных заболеваний. Существенное внимание уделяется области оптической биомедицинской диагностики. Волновые диапазоны видимого и ближнего инфракрасного (БИК) излучения безвредны для человека [1–4]. Излучение данного диапазона способно проникать в биологические ткани и, взаимодействуя с разнообразными структурными и динамическими элементами тканей, передает информа-

цию об изменениях, происходящих в них в ходе различных патологических процессов.

Помимо этого, с развитием оптики и фотоники появилась возможность создания компактных многоканальных оптических мультисенсорных систем, в основе которых лежит целый массив (набор) датчиков, позволяющих получать совокупность откликов оптических сенсоров при анализе исследуемого объекта и проводить одновременную регистрацию сразу нескольких различных параметров исследуемой среды. Все это позволяет разрабатывать диагностические методы, которые способны осуществлять обследование без вмешательства

в организм пациента и получать при этом большое количество данных о состоянии изучаемого биологического объекта [5]. Однако при таком методе обследований врачи получают много цифровой информации, требующей качественной обработки и анализа. В настоящее время решение подобных задач осуществляется с использованием современных информационных технологий, включая методы интеллектуального анализа данных. Технологии интеллектуального анализа данных являются передовой областью медицинских исследований, поскольку они позволяют оценивать риски для пациентов, выделять из получаемой информации данные о патологиях и помогают принимать клинические решения при построении моделей прогнозирования заболеваний [5].

Большая часть всех известных заболеваний сопровождается кислородной недостаточностью или является ее следствием. Адекватная оксигенация тканей является необходимым условием аэробного метаболизма. Недостаток же кислорода в организме может привести к различным заболеваниям и нарушениям функционирования органов. Доставка кислорода в первую очередь зависит от метаболических потребностей и функционального состояния каждого органа [6, 7]. Следовательно, в физиологическом состоянии орган и ткань характеризуются собственным уникальным статусом «тканевой нормы». Таким образом, во многих областях медицины терапия направлена на поддержание, восстановление или оптимизацию оксигенации тканей. На современном этапе о наличии гипоксического состояния достоверно можно судить по данным оценки микроциркуляции и тканевой перфузии, поэтому изучение нарушений микроциркуляции и кислородного статуса тканей является одной из важнейших проблем медицинской практики. Оценка микроциркуляции — неотъемлемая часть медицинской диагностики, которая может быть полезна при диагностике и лечении многих заболеваний, включая диабетическую нейропатию, кожные и сердечно-сосудистые заболевания [8, 9]. Однако методические приемы диагностики нарушений тканевого кровотока во многом еще остаются несовершенными, что существенно затрудняет изучение микроциркуляции в клинических условиях. Так, наиболее распространенным и

доступным методом измерения кровотока является лазерная доплеровская флоуметрия. Но, несмотря на свою эффективность и точность, лазерная доплеровская флоуметрия имеет некоторые недостатки. Основной из них — сложность интерпретации полученных данных из-за влияния множества факторов на результаты измерения. Кроме того, метод требует специализированного оборудования и обученного персонала для проведения исследований. Традиционный электрохимический метод транскутанной оксиметрии также имеет ряд недостатков, которые связаны как с необходимостью использования стационарного оборудования, основанного на данном методе, так и с самим методом [10].

В последнее время все больший интерес привлекает метод оптической спектроскопии в БИК области (БИК-спектроскопия¹). С момента внедрения БИК-спектроскопии в медицину она широко применялась для оценки кислородного статуса головного мозга в кардио- и нейрохирургии. В зависимости от области исследования выделяют тканевую оксиметрию (оксигенацию периферических тканей, под которой чаще всего понимают оксигенацию мышц), висцеральную и церебральную оксигенацию и др. [11, 12].

Целью настоящей работы являются разработка и детальное исследование многоканальной оптической системы (ОС), предназначенной для сбора, передачи и последующего анализа диагностической информации, а также разработка эффективного алгоритма предварительной обработки большого объема оптических сигналов, описывающих состояние биологического объекта, с использованием методов интеллектуального анализа данных.

РАЗРАБОТКА МУЛЬТИСЕНСОРНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Кожа человека содержит огромное количество различных хромофоров. Одним из основных и клинически важных для медицины является гемоглобин. Клинические лабораторные исследования оптических свойств крови показали, что каждая форма гемоглобина имеет свою собственную спектральную характеристику, что позволяет с помощью оптического излучения

¹ Near-infrared spectroscopy, NIRS.

неинвазивным способом, не травмируя и не нарушая структуру кожи, определять сатурацию и кислородное обеспечение тканей человека. Физический принцип работы БИК-спектроскопии лежит в различии оптических характеристик разных форм гемоглобина, которые могут отличаться в зависимости от степени их оксигенации. Эти оптические свойства могут быть использованы для измерения изменений концентрации гемоглобина в биологических тканях, что может служить индикатором изменений в кровоснабжении.

Гемоглобин имеет множество различных пиков поглощения в видимом диапазоне спектра. Поглощающий спектр гемоглобина характеризуется пиками максимального поглощения, которые расположены в областях длин волн 400, 541, 577 и 600 нм видимого спектра излучения. Кроме того, оксигенированный гемоглобин имеет более высокую поглощающую способность в диапазоне длин волн 650–1000 нм, чем деоксигенированный гемоглобин. В связи с этим при разработке сенсорного блока ОС контроля кислородного обеспечения тканей человека за основу было взято использование оптического излучения как видимого, так и БИК диапазонов.

Конструктивно разработанная мультисенсорная ОС представляет собой сложный ком-

плекс для сбора, передачи и анализа информации. Аналитическая информация появляется при взаимодействии излучения с исследуемым образцом, в результате которого меняется спектральный состав излучения, который служит предиктором различных состояний биологического образца. Система состоит из двух основных блоков — многоканального электронно-оптического и вычислительного. С точки зрения геометрии, сенсорный блок ОС реализован в режиме измерения в отраженном свете и предназначен для регистрации обратно рассеянного света от биологических объектов (например, от биологической ткани), испускаемого на их поверхность источниками излучения.

Многоканальный сенсорный блок содержит 18 фотодиодных чувствительных элементов, имеющих селективную чувствительность к излучениям видимого и инфракрасного (ИК) диапазонов на длинах волн от 410 до 940 нм. Каждый фоточувствительный элемент измеряет поверхностную плотность потока излучения — отношение мощности оптического излучения, падающего на поверхность фотоэлемента, к площади этого элемента.

Для обеспечения наиболее широкого спектра испускаемого излучения (с сохранением компактности устройства) в качестве источника света в систему встроены три светодиода

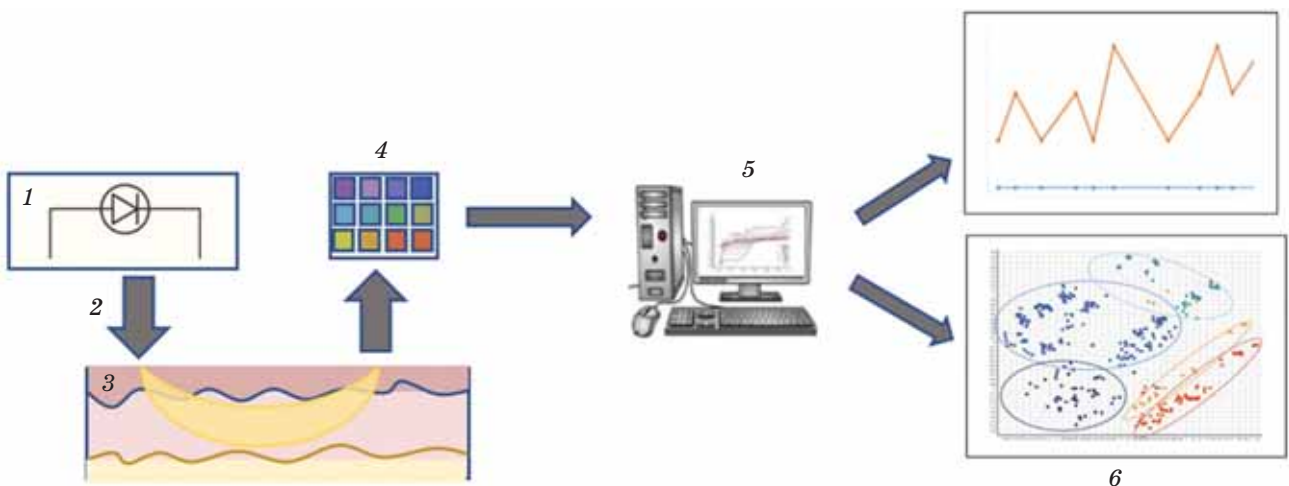


Рис. 1. Структурная схема разработанного аппаратно-программного комплекса, основанного на оптической мультисенсорной системе. 1 — источник излучения, 2 — падающее излучение, 3 — биологический объект, 4 — массив оптических сенсоров, 5 — вычислительный блок, 6 — применение интеллектуального анализа данных

Fig. 1. Block diagram of the developed hardware and software complex based on an optical multisensor system. (1) Radiation source, (2) incident radiation, (3) biological object, (4) array of optical sensors, (5) computing unit, (6) application of data mining

поверхностного монтажа² — белый, красный и ИК. Связь с компьютером осуществляется посредством беспроводного интерфейса Bluetooth для последующего преобразования аналитического сигнала в результат анализа (как качественный, так и количественный), используя многомерные методы обработки информации. Структурная схема работы разработанного аппаратно-программного комплекса представлена на рис. 1.

Для оценки работоспособности системы в качестве устройства для биомедицинской диагностики было проведено экспериментальное исследование. С помощью разработанной многоканальной системы осуществлен мониторинг состояния микроциркуляции верхних конечностей у двадцати испытуемых в возрасте 20 лет. Каждому из них была предложена функциональная нагрузка в виде окклюзионной пробы, которая представляет собой кратковременную остановку кровоснабжения конечности с использованием манжеты. Таким образом, была создана искусственная ишемия конечности с целью инструментальной оценки гемодинамических явлений в биологической ткани.

Во время проведения экспериментального исследования каждый участник эксперимента находился в сидячем положении. Оптическая система размещалась на левом предплечье. После регистрации ОС исходного состояния периферического кровотока в руке испытуемого в течение 1 мин (состояние покоя) проводилась окклюзионная проба посредством накачки манжеты. Через 3 мин происходил сброс давления в манжете и регистрация измерений продолжалась еще 4 минуты. Таким образом, общее время на проведение пробы каждого испытуемого составило 8 мин. Время, прошедшее от момента ограничения кровотока манжетой до полного возобновления кровоснабжения, фиксировалось секундометром. Многоканальные измерения проводились в импульсном режиме с интервалом 10 с.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Разработанный аппаратно-программный комплекс представляет собой многоканальную

мультисенсорную ОС, основанную на массиве (наборе) датчиков, которая позволяет получать совокупность откликов оптических сенсоров при анализе исследуемого объекта и проводить одновременную регистрацию сразу нескольких различных параметров биологической среды. В результате измерений информация с каждого сенсора в числовом формате записывается и сохраняется в виде набора числовых значений зарегистрированных показателей массива сенсоров, формируя многомерную базу данных вида «объект–признак».

По определению многомерные данные содержат информацию о трех или более признаках каждого объекта, т.е. каждый объект описывается не одним параметром, а сразу целым набором (множеством) разных признаков. Одной из основных особенностей таких баз данных является содержание в них большого количества скрытой и при этом значимой для исследования информации, а также неявных взаимосвязей в данных, которые можно выделить, используя современные, специально для этого разработанные методы статистического анализа информации. Для извлечения этой информации обработка полученных данных происходит с использованием различных математических методов анализа многомерных данных (в том числе с применением методов машинного обучения) с целью визуализации и интерпретации полученных результатов. Методы машинного обучения используются в случае визуального представления результатов экспериментальных исследований для распознавания образов, а также для выявления значимой для эксперимента информации. При этом многообразие существующих разработанных методов обработки данных обусловлено множеством изучаемых явлений, которые данными методами должны отображаться и измеряться. Таким образом, правильный выбор и применение метода обработки данных в этих условиях имеют большое значение. Согласно литературным данным в настоящее время можно выявить следующие современные тенденции и подходы, используемые в анализе многомерных данных от мультисенсорных систем [13, 14]:

1. Цель обработки таких данных зачастую сводится к трем основным задачам: распознавание и изучение структуры данных, кластеризация/классификация и идентификация

² Surface-mountable device (SMD).

Пример исходного набора полученных данных одного испытуемого
Example of the initial set of data obtained from one subject

Время эксперимента, с	Поверхностная плотность потока излучения, мкВт/см ²						
	410 нм	435 нм	460 нм	485 нм	510 нм	...	940 нм
10	5,7	7,1	13,2	15,2	16,1	...	1470,3
20	5,7	7,1	13,2	14,3	16,1	...	1440,5
30	5,7	7,1	13,2	14,3	16,1	...	1450,4
40	5,7	7,1	13,2	15,2	16,1	...	1425,6
...
480	4,8	5,3	9,7	11,4	13,	...	1031,8

(в том числе отнесение неизвестного образца к известному классу).

2. Основными методами анализа являются метод главных компонент, метод факторного анализа, метод дискриминантного анализа, а также методы кластерного анализа.

3. В целом процесс обработки многомерной информации предусматривает выполнение четырех основных этапов: подготовки, преобразования, интеллектуального анализа данных и постобработки полученных результатов.

Полученные в экспериментальном исследовании для каждого испытуемого измерения представляют собой массивы числовых значений показаний каждого из 18-ти фоточувствительных элементов. Пример исходного массива полученной информации от одного испытуемого представлен в таблице.

Первичное представление об исходных данных формировалось исходя из общей сводной статистики, описывающей количественные характеристики из набора анализируемой информации. На основании полученных сведений была подтверждена необходимость проведения нормировки данных с целью приведения значений к единому диапазону по стандартной формуле Z -оценки путем вычитания среднего значения из точки данных и деления результата на стандартное отклонение.

Для полученного стандартизированного массива экспериментальных данных построены зависимости, которые отражают изменение стандартизированных оптических сигналов в течение всей нагрузки. Примеры полученных графиков для двух испытуемых представлены на рис. 2.

Анализ представленных графиков позволяет установить, что у испытуемых заметны различные тенденции в изменении кровоснабжения после окклюзии. Данное наблюдение свидетельствует о разноплановых реакциях организма на краткосрочное явление ишемии. Кроме того, графики отражают различную степень адаптации организма к условиям гипоксии тканей, вызванных окклюзией.

Последующий анализ проведен с использованием методов многомерной обработки данных. Как обсуждалось ранее, отклики оптических сенсоров от всех испытуемых образуют матрицу «объект–признак» исходных данных X . Обозначим число признаков, характеризующих каждый объект исследований, как J , а число объектов (испытуемых) — буквой I . Тогда матрица X будет содержать I строк и J столбцов данных, $X = [X_1, X_2, \dots, X_j]$, где $X_j = (x_{1,j}, x_{2,j}, \dots, x_{I,j})^T$ — вектор-столбец, $x_{1,j}, x_{2,j}, \dots, x_{I,j}$ — элементы j -го столбца ($j = 1, 2, \dots, J$). При этом при проведении стандартизации всех данных методом Z -оценки вместо среднего значения всей выборки было взято среднее значение всех числовых показаний 18-ти оптических сенсоров, зарегистрированных до начала нагрузки (состояние покоя), с целью стандартизации всех данных относительно состояния покоя каждого испытуемого. Далее составлялась таблица вида «объект–признак», где в строках указывались номера испытуемых, а в столбцах — показатели каждого из 18-ти фоточувствительных элементов, зарегистрированные во время восстановления кровотока после нагрузки.

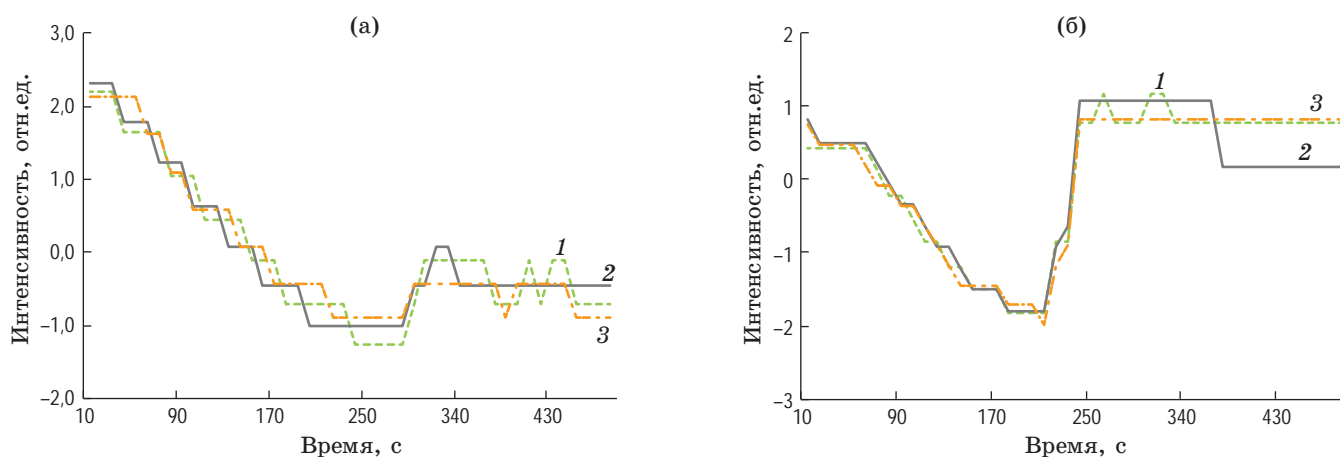


Рис. 2. Графики зависимости зарегистрированных стандартизованных численных показаний оптических датчиков от времени на длинах волн 730 (1), 760 (2) и 810 (3) нм в течение экспериментального исследования испытуемых со слабой динамикой восстановления параметров кровотока после снятия манжеты — (а) и с выраженным увеличением кровотока после окклюзии (выраженная гиперемия) — (б)
Fig. 2. Graphs of the dependence of the recorded standardized numerical readings of optical sensors on time at wavelengths of (1) 730, (2) 760 and (3) 810 nm during an experimental study of subjects (a) with weak dynamics of restoration of blood flow parameters after removing the cuff and (б) with a pronounced increase in blood flow after occlusion (severe hyperemia)

Важным этапом обработки любых многомерных данных является их представление в системе координат, позволяющее в полной мере получить информацию об исследуемых объектах. Для решения этой задачи с использованием мультисенсорных систем одним из наиболее удобных является метод главных компонент (МГК). Этому методу посвящено большое количество работ, он широко представлен в статистической литературе, обратившись к которой можно получить информацию о МГК с различной степенью детализации [15–17]. Представление в пространстве главных компонент направлено на устранение мультиколлинеарности в данных, что приводит к преобразованию J -мерного исходного пространства X в другое пространство (обозначим его T), в котором можно выбрать подмножество переменных меньшей размерности $J_0 < J$ без существенной потери информации. Если переменные пространства T находят из условия сохранения большей части суммарной дисперсии, то применяют ортогональные преобразования. В МГК они осуществляются с помощью квадратной матрицы P , элементы которой векторы p удовлетворяют условию

$$K_X p_r = \lambda_r p_r, \quad (1)$$

где K — ковариационная матрица исходных данных X

$$K_X [k_{j,r}] = \text{cov}(x_{i,j}, x_{i,r}) = \left[\sum_{i=1}^I (x_{i,j} - \bar{x}_j)^T (x_{i,r} - \bar{x}_r) \right] / (I-1), \quad (2)$$

p и λ — собственные векторы и собственные числа этой матрицы, $r = 1, 2, \dots, J$, \bar{x}_j и \bar{x}_r — средние значения по столбцам матрицы X .

Собственные векторы p_r образуют систему ортонормированных векторов $P = [p_1, p_2, \dots, p_J]$ таких, что

$$(p_j^T p_j) = \begin{cases} 1, & \text{если } i = j \\ 0, & \text{если } i \neq j' \end{cases} \quad (3)$$

где вектор-столбец $p_j = [p_{1,j}, p_{2,j}, \dots, p_{J,j}]^T$.

В этой системе координат

$$X = TP + E = \sum_{j=1}^A t_j p_j' + E, \quad (4)$$

где матрицу T называют матрицей счетов³, ее размерность — $(I \times J)$; матрицу P — матрицей нагрузок⁴, ее размерность $(J \times J)$; E — это матрица остатков размерностью $(I \times J)$; t_j назы-

³ Scores.

⁴ Loadings.

ваются главными компонентами⁵, J — число главных компонент [16].

Число столбцов t_j в матрице T и p_j в матрице P равно эффективному рангу матрицы X .

При этом векторы счетов t_j вычисляются как

$$t_j = X p_j, \quad (5)$$

т.е. являются линейной комбинацией исходных значений матрицы X .

Столбцы матрицы P ортонормированы, т.е. $P'P = I$ — единичной матрице. Столбцы t_j ортогональны и $t_j' t_j / (I - 1) = \lambda_j$, где величины $\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_J > 0$. Это значит, что первые главные компоненты содержат основную информацию, полезную для понимания того, как устроены данные [18].

Для получения статистически устойчивых результатов обработки данных число объектов I должно быть большим (по крайней мере больше десяти). Каждый объект графически можно представить в виде точки в J -мерном пространстве (пространстве измерений), образуя «облако» из I точек.

Кроме того, множество объектов могут сформировать несколько «облаков», которые в статистике называют кластерами. Различные методы кластеризации позволяют выявлять группы похожих образцов. Это, в свою очередь, дает возможность классифицировать многокомпонентные среды и создавать группу «образцов-эталонов». Затем их можно использовать для сравнения с неизвестными образцами, которые подлежат анализу в мультисенсорной системе. Например, параметры объектов в каждом кластере содержат информацию о том или ином заболевании, что помогает быстро поставить диагноз. Кластеры — непересекающиеся подмножества исходных данных X . Каждый кластер состоит из объектов, близких по метрике, а объекты разных кластеров существенно отличаются признаками.

На рис. 3 представлена визуализация результата применения МГК для набора данных, полученных в ходе экспериментального исследования, в виде диаграммы рассеяния, на которой данные каждого испытуемого представлены точкой на графике. Как видно, на диаграмме отчетливо прослеживается дифференциация испытуемых по реакции пери-

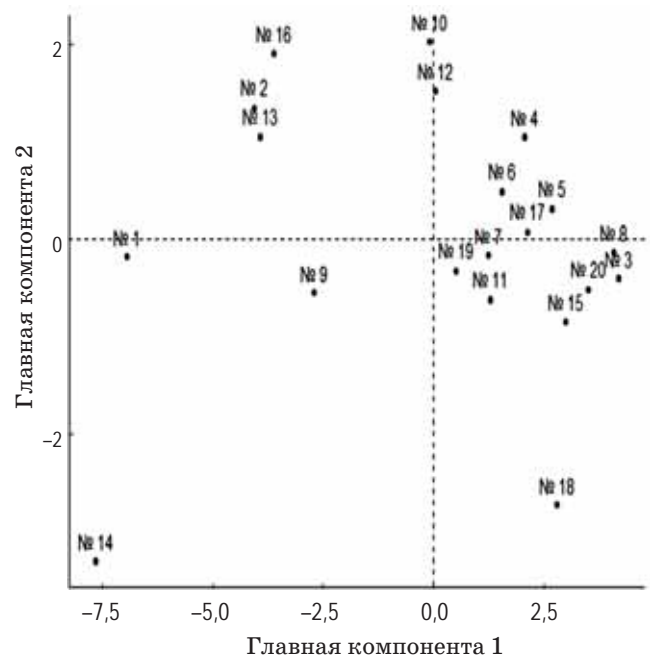


Рис. 3. Визуализация результата применения МГК для набора данных, полученных в ходе экспериментального исследования, в виде диаграммы рассеяния

Fig. 3. Visualization of the result of applying the principal component method to the data set obtained during the experimental study in the form of a scatterplot

ферического микроциркуляторного кровотока на кратковременную остановку кровоснабжения в руке, что может свидетельствовать о нарушениях кислородтранспортных функций крови у части испытуемых.

На рис. 4 представлен модифицированный график МГК с классификацией объектов, показывающий распределение объектов (испытуемых) по кластерам — в первом 6 испытуемых, во втором — 14.

Таким образом, проведенный анализ результатов измерений, зарегистрированных ОС при выполнении окклюзионной пробы, позволил выявить различные тенденции в изменении кровенаполнения конечностей после проведения нагрузочных проб. С помощью методов интеллектуального анализа данных осуществлена визуализация результатов ранжирования, которая позволила выявить скрытые закономерности в изменении кровенаполнения конечностей по показаниям оптических сенсоров. Для проверки эффективности использования разработанной ОС было проведено

⁵ Principal Components.

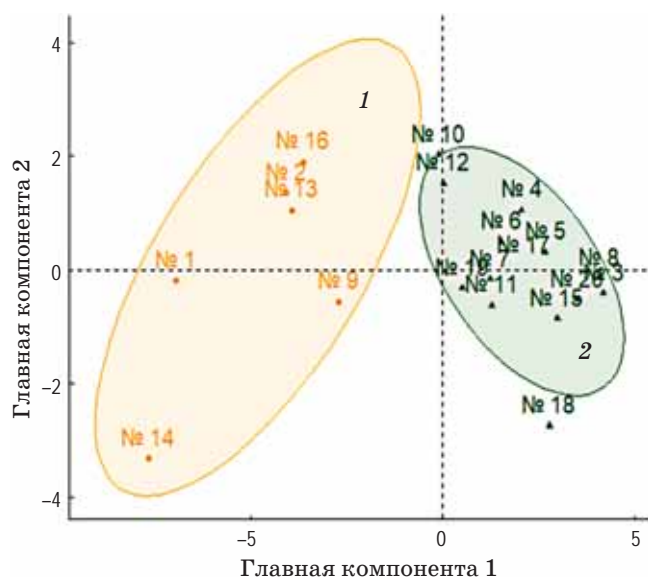


Рис. 4. Модифицированный график МГК с кластеризацией испытуемых на две группы (в группе (1) 6 испытуемых, в группе (2) 14 испытуемых) с различными ответными реакциями микроциркуляции в результате нагрузочной пробы

Fig. 4. Modified graph of the principal component method with clustering of subjects into two groups (in group (1) 6 subjects, in group (2) 14 subjects) with different microcirculation responses as a result of the stress test

независимое медико-биологическое исследование. Исследование представляло собой сравнение полученных результатов анализа с результатами, полученными с помощью традиционного метода неинвазивной диагностики — транскутанного оксиметра. Сравнение данных позволило выявить, что разделение объектов на кластеры обусловлено различными типами микроциркуляторной гемодинамики у испытуемых.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Дунаев А.В. Мультимодальная оптическая диагностика микроциркуляторно-тканевых систем организма человека: монография. Старый Оскол: ТНТ, 2022. 440 с.
Dunaev A.V. Multimodal optical diagnostics of microcirculatory tissue systems of the human body: Monograph [in Russian]. Stary Oskol: TNT, 2022. 440 p.
2. Дунаев А.В. Метод и устройство оценки функционального состояния микроциркуляторно-тканевых систем организма человека на основе мультипараметрической оптической диагностики // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 23. № 4. С. 77–91.

ВЫВОДЫ

Разработана многоканальная ОС, предназначенная для решения задач идентификации и анализа состояния сложных многокомпонентных биологических тканей и жидкостей организма человека, а также анализа диагностической информации. Система основана на методе оптической тканевой оксиметрии, который позволяет неинвазивно оценивать динамику транспорта и потребления кислорода в системе микроциркуляции крови [19–21].

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о высокой эффективности разработанной многоканальной ОС. Основным преимуществом системы по сравнению с другими существующими приборами является ее портативность. Возможна интеграция системы в переносные устройства, что позволяет проводить измерения не только при выполнении испытуемым функциональных тестов, но и при физических нагрузках. Также ОС спроектирована для работы в многоволновом режиме (как в видимом, так и в БИК диапазонах). Это позволяет расширить набор измеряемых параметров и при необходимости уменьшить влияние мешающих факторов на получаемый сигнал, например, в случае попадания на фотоприемники системы излучений от посторонних источников.

В работе подчеркивается значимость применения проекционных методов для анализа многоканальных измерений, получаемых в результате работы системы. Показано, что применение методов интеллектуального анализа данных позволяет качественно интерпретировать собираемую сложную многомерную информацию, что способствует значительному расширению возможностей оптической биомедицинской диагностики.

3. Pirzada M., Altintas Z. Recent progress in optical sensors for biomedical diagnostics // Micromachines. 2020. V. 11. № 4. P. 356. <https://doi.org/10.3390/mi11040356>
4. Tian L., Hunt B., Bell M., et al. Deep learning in biomedical optics // Lasers in Surgery and Medicine. 2021. V. 53. № 6. P. 748–775. <https://doi.org/10.1002/lsm.23414>

5. Богомолов А.Ю. Оптические мультисенсорные системы в аналитической спектроскопии // Журнал аналитической химии. 2022. Т. 77. № 3. С. 227–247. Bogomolov A.Yu. Optical multisensor systems in analytical spectroscopy [in Russian] // J. Analytical Chemistry. 2022. V. 77. № 3. P. 227–247.
6. Ali J., Cody J., Maldonado Y., et al. Near-infrared spectroscopy (NIRS) for cerebral and tissue oximetry: Analysis of evolving applications // J. Cardiothoracic and Vascular Anesthesia. 2022. V. 36. № 8. P. 2758–2766. <https://doi.org/10.1053/j.jvca.2021.07.015>
7. Scholkman F., Scherer-Vrana A. Comparison of two NIRS tissue oximeters (moxy and nimo) for non-invasive assessment of muscle oxygenation and perfusion // Oxygen Transport to Tissue XLI. 2020. P. 253–259. https://doi.org/10.1007/978-3-030-34461-0_32
8. Рогаткин Д.А., Лапитан Д.Г., Рогаткин Д.А. Функциональные исследования системы микроциркуляции крови методом лазерной доплеровской флоуметрии в клинической медицине: проблемы и перспективы // Альманах клинической медицины. 2016. Т. 44. № 2. С. 249–259. Rogatkin D.A., Lapitan D.G., Rogatkin D.A. Functional studies of the blood microcirculation system using laser Doppler flowmetry in clinical medicine: Problems and prospects [in Russian] // Almanac of Clinical Medicine. 2016. V. 44. № 2. P. 249–259.
9. Рогаткин Д.А., Лапитан Д.Г., Колбас Ю.Ю. и др. Индивидуальная вариабельность параметров микроциркуляции крови и проблемы функциональной диагностики системы микроциркуляции // Функциональная диагностика. 2012. Т. 4. С. 9–24. Rogatkin D.A., Lapitan D.G., Kolbas Yu.Yu., et al. Individual variability of blood microcirculation parameters and problems of functional diagnostics of the microcirculation system [in Russian] // Functional Diagnostics. 2012. V. 4. P. 9–24.
10. de Keijzer I.N., Massari D., Sahinovic M., et al. What is new in microcirculation and tissue oxygenation monitoring? // J. Clinical Monitoring and Computing. 2022. V. 36. № 2. P. 291–299. <https://doi.org/10.1007/s10877-022-00837-x>
11. Cornelis N., Chatzinikolaou P., Buys R., et al. The use of near infrared spectroscopy to evaluate the effect of exercise on peripheral muscle oxygenation in patients with lower extremity artery disease: A systematic review // Europ. J. Vascular and Endovascular Surgery. 2021. V. 61. № 5. P. 837–847. <https://doi.org/10.1016/j.ejvs.2021.02.008>
12. Heise H.M. Medical applications of NIR spectroscopy // Near-Infrared Spectroscopy: Theory, Spectral Analysis, Instrumentation, and Applications / 2021. P. 437–473.
13. Леонов В.Е. Программное обеспечение для обработки данных мультисенсорной системы типа «электронный нос» // Информационные технологии в науке и производстве. 2018. С. 46–51. Leonov V.E. Software for data processing of a multi-sensory system such as “electronic nose” [in Russian] // Information Technol. in Sci. and Production. 2018. P. 46–51.
14. Власов Ю.Г., Легин А.В., Рудницкая А.М. Мультисенсорные системы типа электронный язык — новые возможности создания и применения химических сенсоров // Успехи химии. 2006. Т. 75. № 2. С. 141–150. Vlasov Yu.G., Legin A.V., Rudnitskaya A.M. Multisensory systems of the electronic tongue type — new possibilities for the creation and application of chemical sensors [in Russian] // Advances in Chem. 2006. V. 75. № 2. P. 141–150.
15. Kherif F., Latypova A. Principal component analysis. Machine Learning — Academic Press, 2020. P. 209–225. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815739-8.00012-2>
16. Hasan B.M., Abdulazeez A.M. A review of principal component analysis algorithm for dimensionality reduction // J. Soft Computing and Data Mining. 2021. V. 2. № 1. P. 20–30.
17. Maćkiewicz A., Ratajczak W. Principal components analysis (PCA) // Computers & Geosciences. 1993. V. 19. № 3. P. 303–342.
18. Родионова О.Е. Хемометрический подход к исследованию больших массивов химических данных // Российский химический журнал. 2006. Т. 50. № 2. С. 128–144. Rodionova O.E. Chemometric approach to the study of large amounts of chemical data [in Russian] // Russian Chemical J. 2006. V. 50. № 2. P. 128–144.
19. Рогаткин Д.А., Быченко О.А., Поляков П.Ю. Неинвазивная спектрофотометрия в современной радиологии: вопросы точности и информативности результатов измерений // Альманах клинической медицины. 2008. № 17–1. С. 83–87. Rogatkin D.A., Bychenkov O.A., Polyakov P.Yu. Non-invasive spectrophotometry in modern radiology: Issues of accuracy and informativeness of measurement results [in Russian] // Almanac of Clinical Medicine. 2008. № 17–1. P. 83–87.
20. Афанасьев А.И., Рогаткин Д.А., Сергиенко А.А. и др. Новое поколение приборов неинвазивной спектрофотометрии: оптический тканевый оксиметр и анализатор объемного кровенаполнения мягких биологических тканей «Спектротест» // Доктор. ру. 2007. № 4. С. 45–47. Afanasyev A.I., Rogatkin D.A., Sergienko A.A., et al. New generation of non-invasive spectrophotometry devices: Optical tissue oximeter and analyzer of volumetric blood filling of soft biological tissues “Spectrotest” [in Russian] // Dr. RU. 2007. № 4. P. 45–47.
21. Рогаткин Д.А. Физические основы оптической оксиметрии // Медицинская физика. 2012. № 2. С. 97–114. Rogatkin D.A. Physical foundations of optical oximetry [in Russian] // Medical Phys. 2012. № 2. P. 97–114.

АВТОРЫ

Мария Сергеевна Мазинг — младший научный сотрудник, Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург, 198095, Россия; Scopus ID: 57202837236; <https://orcid.org/0000-0003-1739-9671>; mazmari@mail.ru

Анна Юрьевна Зайцева — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт аналитического

AUTHORS

Mariia S. Mazing — Junior Researcher, Institute of Analytical Instrumentation of the RAS, St. Petersburg, 198095, Russia; Scopus ID: 57202837236; <https://orcid.org/0000-0003-1739-9671>; mazmari@mail.ru

Anna Yu. Zaitceva — PhD (Physics and Mathematics), Senior Researcher, Institute of Analytical Instrumentation of the RAS,

приборостроения РАН, Санкт-Петербург, 198095, Россия; Scopus ID: 57212674945; <https://orcid.org/0000-0003-0334-2770>; anna@da-24.ru

Лев Васильевич Новиков — доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург, 198095, Россия; Scopus ID: 10046217100; <https://orcid.org/0009-0001-6930-8762>; novik38@mail.ru

St. Petersburg, 198095, Russia; Scopus ID: 57212674945; <https://orcid.org/0000-0003-0334-2770>; anna@da-24.ru

Lev V. Novikov — Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Leading Researcher, Institute of Analytical Instrumentation of the RAS, St. Petersburg, 198095, Russia; Scopus ID: 10046217100; <https://orcid.org/0009-0001-6930-8762>; novik38@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 15.01.2024
Одобрена после рецензирования 08.04.2024
Принята к печати 30.05.2024*

*The article was submitted to the editorial office 15.01.2024
Approved after review 08.04.2024
Accepted for publication 30.05.2024*