
**ПРИБОРОСТРОЕНИЕ ДЛЯ БИОЛОГИИ
И МЕДИЦИНЫ**

УДК 543.2, 681.2– 5, 664.3.032.9

© М. М. Гузенко, А. Ю. Зайцева, 2022

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СЕНСОРНАЯ СИСТЕМА
РАНЖИРОВАНИЯ ИОННОГО СОСТАВА
ГРУДНОГО МОЛОКА**

Разработана и исследована интеллектуальная сенсорная система, позволяющая проводить качественное медицинское ранжирование грудного молока и молочной продукции. Используются электрохимические сенсоры, обладающие чувствительностью к основным значимым компонентам исследуемой биологической среды. Установлено, что "цифровые образы" грудного молока женщин, перенесших заболевания, значительно отличаются от таковых для группы здоровых женщин. Применен метод главных компонент для ранжирования грудного и коровьего молока, выявлены группы биологических сред, схожие по своим свойствам. Анализируя результаты исследований, можно говорить об эффективности применения разрабатываемой методики для медико-биологических исследований.

Кл. сл.: грудное молоко, система ранжирования, сенсорная система, метод главных компонент, электрохимические сенсоры

ВВЕДЕНИЕ

Качественный ионный состав грудного молока является основным фактором, определяющим полноценность роста, физического и интеллектуального здоровья новорожденных в течение всего жизненного цикла. Изучение многоуровневой системы механизмов, определяющих и контролирующих ионный состав молока, — важная проблема физиологии лактации [1]. Грудное молоко является динамической жидкостью организма, были представлены клинические доказательства изменения состава грудного молока в зависимости от меняющихся потребностей младенца [2]. Грудное молоко также может активно стимулировать ускоренное развитие защитных систем новорожденного и подавлять чрезмерное воспаление в ответ на различные раздражители до тех пор, пока не разовьется собственный иммунный ответ кишечника [3].

Научная проблема, на решение которой направлено исследование, состоит в сложности идентификации функционального состояния системы мать – новорожденный в рамках стандартных медицинских методов анализа. Целью данной работы являются фундаментальные исследования, направленные на комплексное решение проблемы идентификации и анализа состояния сложных многокомпонентных биологических сред, а именно качественного ионного состава грудного молока на основе новых интеллектуальных методов электрохимического анализа. В настоящее время большинство медицинских учреждений из-за

отсутствия необходимой методологической и приборной базы вынуждены ограничиваться в основном субъективной трактовкой медицинским персоналом анализов различных типов, которые могут существенно меняться в зависимости от специалиста, изучающего результаты, и косвенных методов определения функционального состояния системы мать – новорожденный.

Впервые разработан метод неинвазивной диагностики, сущность которого состоит в применении массива электрохимических сенсоров с чувствительностью к основным значимым компонентам исследуемой среды, их анализа с помощью искусственных нейроподобных систем и математических методов обработки массивов многомерной информации, в том числе метода главных компонент. Предлагаемый подход отличается от существующих методов тем, что не требует высокоточного определения содержания в биологических средах определенных компонентов, а предлагается использовать массив сенсоров, где каждый сенсор реагирует на присутствие сразу нескольких компонентов анализируемой среды. Получаемая совокупность многомерных данных требует современной математической обработки. С этой целью для обработки данных применяется метод машинного обучения: метод главных компонент.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для решения задачи контроля качественного ионного состава грудного молока была осуществлена разработка конструкции и проведены

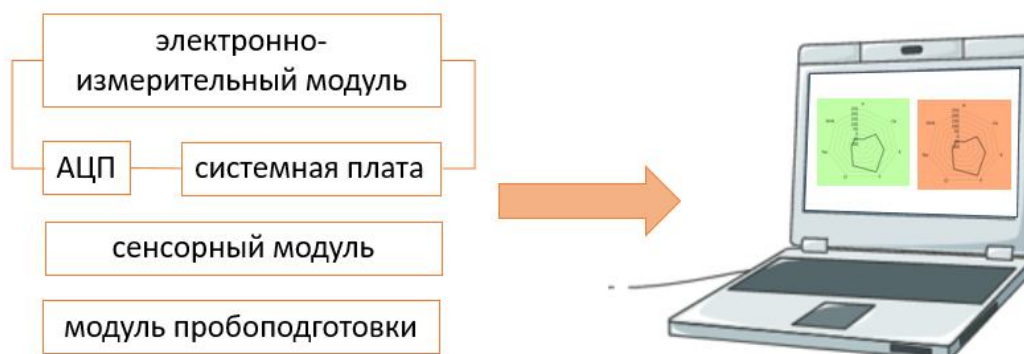


Рис. 1. Блок-схема интеллектуальной сенсорной системы

испытания основных блоков интеллектуальной сенсорной системы [4]. В качестве сенсоров было предложено использовать электрохимические электроды на основе полимерных пластифицированных потенциметрических мембран [5]. Полимерная основа во всех применяемых мембранах представляла собой поливинилхлорид. В качестве растворителя-пластификатора применены ди-2-этилгексилсебацинат, о-нитрофенилоктиловый эфир и 2-фторфенил-2-итрофениловый эфир.

Интеллектуальная сенсорная система состоит из двух основных блоков. Измерительный блок включает в себя модули пробоподготовки, сенсорный, микропроцессорный измерительный модули. Информационный блок включает в себя модули обучения, распознавания и визуализации образов. Блок-схема опытного образца сенсорной системы приведена на рис. 1.

Модуль пробоподготовки содержит устройство для установки сенсоров в исследуемую среду, ее термостатирования и перемешивания для обеспечения однородности ее состава вдали и у поверхности сенсоров.

Сенсорный модуль представлен массивом полиселективных электрохимических сенсоров с перекрестной чувствительностью к биологически важным компонентам

Модуль обучения и распознавания представлен в виде математической модели, реализующей функции обучения системы и распознавания многомерных "образов", формируемых сенсорным модулем в виде массивов значений ЭДС.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

На подготовительном этапе проведения исследований были отработаны составы рабочих растворов для калибровки, кондиционирования,

хранения сенсоров и оценки их перекрестной чувствительности, а также методики подготовки сенсоров к измерению, оценки их характеристик в контрольных растворах.

Исследования были проведены на четырнадцать испытуемых женского пола в период лактации, а также были исследованы девятнадцать образцов ультрапастеризованного и цельного коровьего молока с целью оценки и демонстрации работоспособности интеллектуальной сенсорной системы в плане возможности получения "цифровых образов" исследуемых проб молока и их визуального представления. Были использованы 7 потенциметрических полиселективных сенсоров (H^+ , Na^+ , K^+ , Cl^- , NH_4^+ , F^- , рН) с перекрестной чувствительностью.

ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Построение цифровых образов

Визуальное отображение результатов исследования двух наиболее типичных испытуемых, одна из которых в течение последнего месяца переболела вирусной инфекцией, представлено на рис. 2 в виде "образов" их грудного молока — семигранников с лучами, исходящими от центра к точкам пересечения граней. Длина луча в точках пересечения граней соответствует результату измерения потенциала, генерируемого каждым полиселективным электродом.

Также были получены "цифровые образы" грудного молока женщин, которые в период лактации перенесли инфекцию молочной железы, связанную с деторождением. Примеры "цифровых образов" грудного молока испытуемых в динамике представлены на рис. 3. Было проведено наблюдение

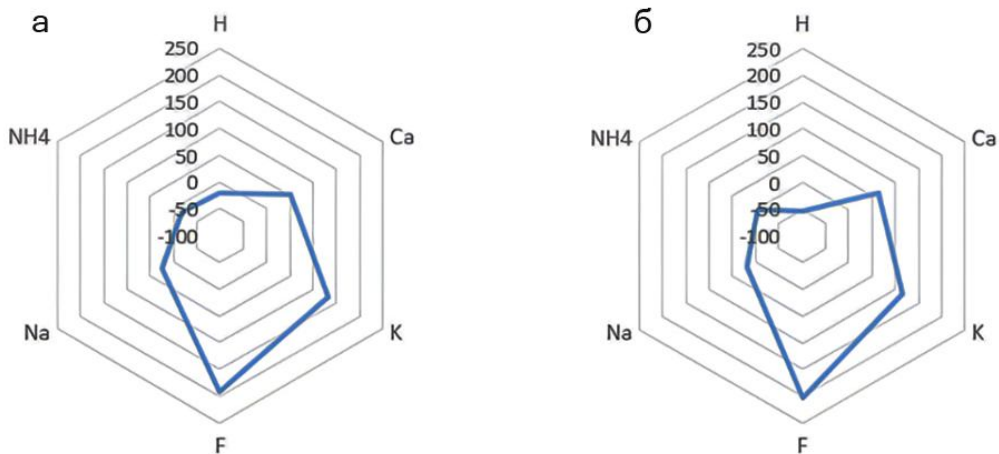


Рис. 2. "Цифровые образы" грудного молока здоровой женщины (а) и женщины, перенесшей в последний месяц вирусное заболевание (б)

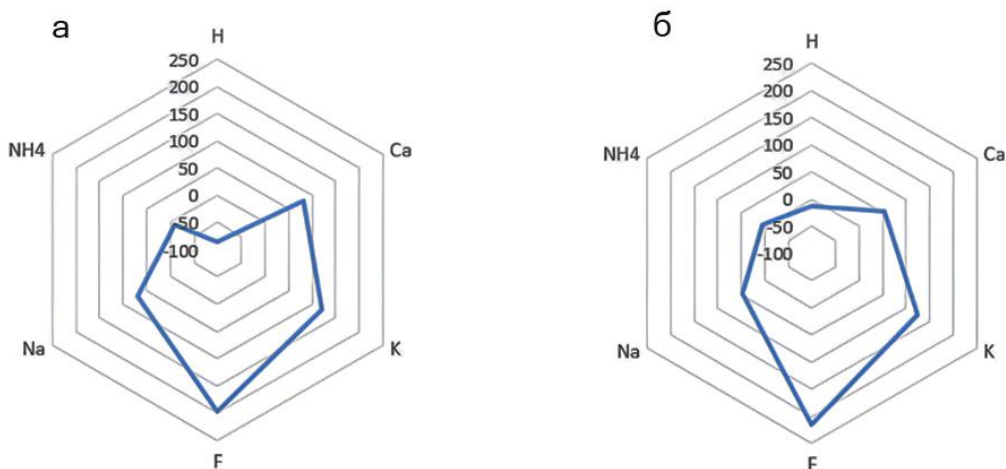


Рис. 3. Визуальное представление "цифрового образа" грудного молока женщины с инфекционным заболеванием молочной железы до приема антибактериальной терапии (а) и после приема терапии (б)

за изменением состояния молока до и после приема антибактериальной терапии.

Результаты проведенных исследований показывают, что "цифровой образ" грудного молока каждой из испытуемых в здоровом состоянии, формируемый композицией потенциалов, генерируемых 7 электрохимическими сенсорами, имеет свои индивидуальные особенности. Заболевания видоизменяют его. Установлено, что "цифровые образы" грудного молока женщин, перенесших заболевания, значительно отличаются от диаграмм грудного молока здоровых.

Выявленные в проведенных экспериментальных исследованиях возможности исследуемой сенсорной системы формировать индивидуальные "образы" грудного молока испытуемых были использованы для формирования алгоритмов обучения сенсорной системы к распознаванию функционального состояния системы мать – новорожденный.

Метод главных компонент

Были сформированы две таблицы вида "объекты – признаки", где строкам соответствуют объекты

измерений, а столбцам — признаки, т.е. зарегистрированные численные стандартизованные показания каждого из семи электрохимических датчиков.

Первая таблица была составлена для образцов грудного молока, вторая таблица содержала данные, полученные при анализе ультрапастеризованного и цельного коровьего молока.

На основе этих таблиц были определены две 7-мерные (по числу измеряемых признаков) матрицы, на каждой из осей которых откладывались значения признаков. Так как каждый объект-точка в матрице описывается вектором с высокой (7) размерностью, то на последующем этапе анализа информации принимались меры для снижения размерности пространства данных с минимальными потерями их информативности [6].

Кроме того, была поставлена задача визуализации многомерных данных. Для ее выполнения был применен метод главных компонент (МГК, PCA), традиционно использующийся для сохранения максимального количества информации о наборе данных в минимальном количестве переменных,

снижая размерность пространства [7]. С помощью МГК можно уменьшить число признаков, выбрав самые изменчивые из них. Для этого, используя библиотеку `scikit-learn` (пакет с открытым исходным кодом из экосистемы Python), производится следующий алгоритм действий: стандартизация исходного диапазона данных, вычисление ковариационной матрицы для исходных данных, вычисление собственных значений и собственных векторов ковариационной матрицы для перехода к новым переменным — главным компонентам (ГК, PC). Алгоритм подбирает такие веса для главных компонент, чтобы ГК1 и ГК2 имели наибольшую выборочную дисперсию и при этом не коррелировали друг с другом [8].

Изначально количество главных компонент равно числу исходных переменных (признаков), кроме того, сумма их выборочных дисперсий равна 100%, это значит, что все главные компоненты вместе точно описывают совокупную дисперсию исходных переменных [9]. Визуализация доли объясняемой дисперсии разными компонентами представлена на рис. 4.

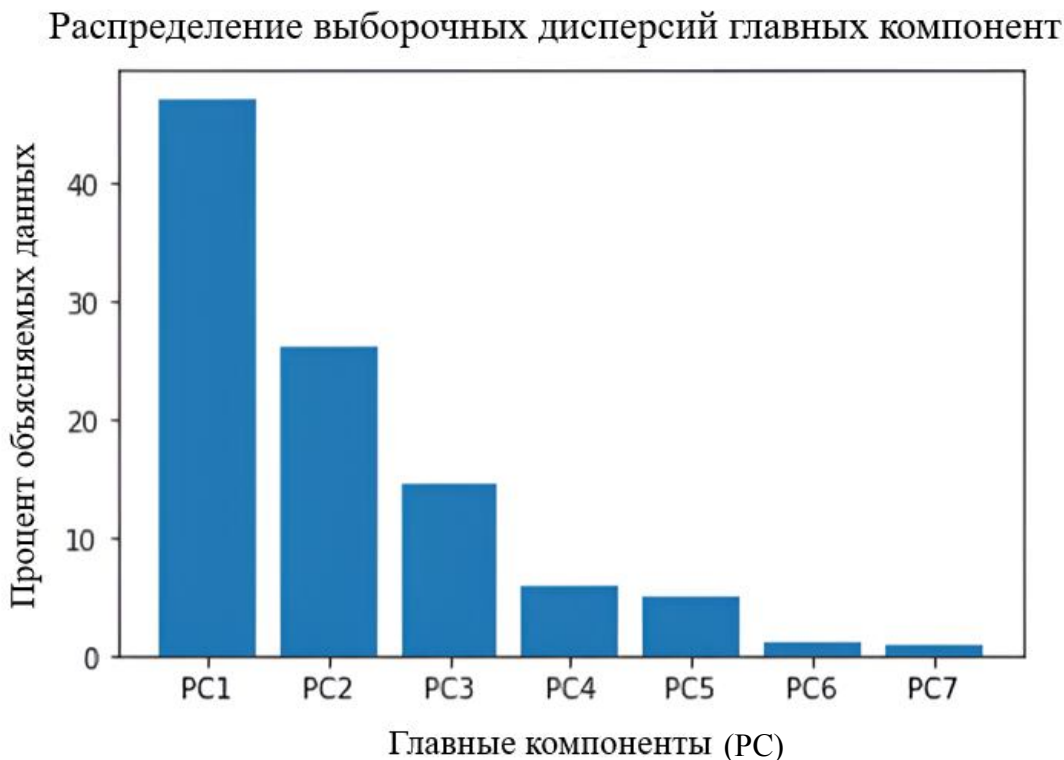


Рис. 4. Вклады каждой компоненты в общую изменчивость исходных данных

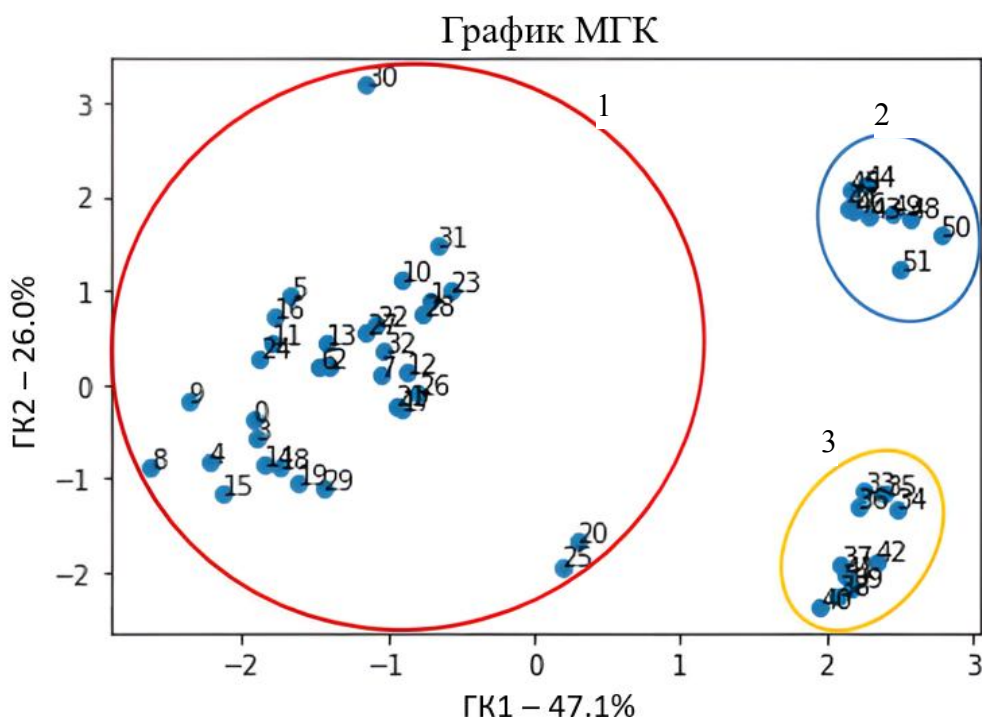


Рис. 5. "Цифровые образы" биологических сред грудного и коровьего молока в проекции на плоскость двух первых главных компонент массива данных электрохимических сенсоров. По оси X отложена первая главная компонента, по оси Y — вторая главная компонента. Кластер 1 — грудное молоко, 2 — цельное молоко, 3 — ультрапастеризованное молоко

В результате анализа данным методом мы смогли визуализировать полученные данные в пространстве первых двух главных компонент (ГК1, ГК2), т.к. они имеют максимальную выборочную дисперсию и описывают наибольшую часть датасета — 73.1% исходных данных, результат представлен на рис. 5. Каждая испытываемая биологическая среда (грудное либо коровье молоко) характеризуется двумерной точкой, содержащей информацию о его исходных признаках, так что можно оценить качество образца в зависимости от его расположения относительно сформировавшихся кластеров.

На рис. 5 приведены "цифровые образы" биологических сред грудного и коровьего молока в проекции на плоскость двух первых главных компонент. Кластер, помеченный 1, — грудное молоко, 2 — цельное молоко, 3 — ультрапастеризованное молоко.

В ходе проведения исследования выявлены следующие тенденции:

1. У биологических сред наблюдается тенденция к группированию, что свидетельствует об их схожести по определенным критериям.

2. Группы цельного и ультрапастеризованного молока сильно отличаются как между собой, так и от грудного молока, что визуально отображается как три различных кластера точек в пространстве двух первых главных компонент.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан, изготовлен и испытан макет интеллектуальной сенсорной системы формирования образа биологических сред на основании анализа выходных сигналов массива полиселективных сенсоров с перекрестной чувствительностью. Экспериментально показано, что "цифровой образ" грудного молока каждой из испытываемых в здоровом состоянии имеет свои индивидуальные особенности. Заболевания видоизменяют его. Установлено, что "цифровые образы" грудного молока женщин, перенесших заболевания, значительно отличаются от "цифровых образов" грудного молока здоровых женщин.

Использование проекционных методов для построения "цифрового образа" биологических сред

достаточно перспективно и позволяет получить результат в простой и наглядной форме в виде точек на плоскости двух первых главных компонент. Показана возможность ранжирования молока по группам схожести.

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о высокой эффективности нового методического подхода к решению проблем идентификации и анализа состояния сложных многокомпонентных биологических сред, а именно качественного ионного состава грудного молока, на основе новых интеллектуальных методов электрохимического анализа. Представленная в данной работе интеллектуальная сенсорная система может быть использована при создании нового поколения диагностических систем медицинского назначения.

Исследование выполнено в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-00761-22-00.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кислякова Л.П. Динамика формирования водно-солевого состава молока. Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Спб. гос. ун-т., 1996. 33 с.
2. Lawrence P.B. Breast milk: best source of nutrition for term and preterm infants // *Pediatric Clinics of North America*. 1994. Vol. 41, is. 5. P. 925–941.
3. Walker A. Breast milk as the gold standard for protective nutrients // *The Journal of pediatrics*. 2010. Vol. 156, is. 2. P. S3–S7.
4. Кислякова Л.П., Буляница А.Л., Кисляков Ю.Я., Гуляев В.И. Оценка функционального состояния человека при физических нагрузках по показателям конденсата выдыхаемого воздуха, регистрируемым полиселективными электрохимическими сенсорами, с применением проекционных методов многомерного анализа // *Научное приборостроение*. 2016. Т. 26, № 2. С. 37–47.
URL: <http://iairas.ru/mag/2016/abst2.php#abst5>
5. Pechenkina I.A., Mikhelson K.N. Materials for the ionophore-based membranes for ion-selective electrodes: Problems and achievements // *Russian Journal of Electrochemistry*. 2015. Vol. 51, no. 2. P. 93–102.
6. Тенев В.А., Шаура А.С. Применение методов снижения размерности данных к построению нечетких нейронных сетей // *Интеллектуальные системы в производстве*. 2020. Т. 18, № 4. С. 109–116.
7. Бондарев А.Е., Галактионов В.А. Исследование многомерных данных в задачах многопараметрической оптимизации // *Новые информационные технологии в автоматизированных системах*. 2013. № 16. С. 84–92.
8. Esbensen K.H. *Multivariate Data Analysis – in practice*. CAMO Software, 5th Edition, 2010, Oslo. 597 p.
9. Jolliffe I.T. *Principal component analysis for special types of data* // *Principal component analysis*. Springer, New York, 2002. P. 338–372. DOI: 10.1007/0-387-22440-8_13

**Институт аналитического приборостроения РАН,
Санкт-Петербург**

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

Материал поступил в редакцию 24.09.2022

INTELLIGENT SENSOR SYSTEM FOR RANKING THE IONIC COMPOSITION OF BREAST MILK

M. M. Guzenko, A. Yu. Zaitceva

Institute for Analytical Instrumentation of RAS, Saint Petersburg, Russia

An intelligent sensor system has been developed and investigated that allows qualitative medical ranking of breast milk and dairy products. Electrochemical sensors with sensitivity to the principal significant components of the biological medium under study were used. It was found that the 'digital images' of the breast milk of women who had undergone disease differed significantly from those of healthy women. The principal component method has been applied to rank breast milk and cow's milk, and groups of biological media similar in their properties have been identified. Analyzing the results of the studies, it is possible to state the effectiveness of the developed method for biomedical research.

Keywords: breast milk, ranking system, sensor system, principal component method, electrochemical sensors

INTRODUCTION

The qualitative ion composition of breast milk is the main factor determining the completeness of growth, physical and intellectual health of newborns throughout the life cycle. The study of a multi-level system of mechanisms that determine and control the ionic composition of milk is an important problem in the physiology of lactation [1]. Breast milk is a dynamic body fluid, clinical evidence of a change in the composition of breast milk depending on the changing needs of the infant has been presented [2]. Breast milk can also actively stimulate the accelerated development of the newborn's defense systems and suppress excessive inflammation in response to various stimuli until the digestive tract's own immune response develops [3].

The scientific problem that the research is aimed at is the complexity of identifying the functional state of the mother–newborn system within the framework of standard medical methods of analysis. The purpose of this work is fundamental research aimed at a comprehensive solution to the problem of identification and analysis of the state of complex multicomponent biological media, namely the qualitative ion composition of breast milk based on new intelligent methods of electro-chemical analysis. At present, most health facilities, due to the lack of the necessary methodological and instrumental base, are forced to be limited mainly by the subjective interpretation of analyses of various types by medical personnel. Specialist can significantly affect the results and indirect methods for determining the functional state of the mother–newborn system.

For the first time, a method of non-invasive diagnostics was developed, the essence of which consists in the use of an array of electrochemical sensors sensi-

tive to the main significant components of the medium under study, their analysis using artificial neural-like systems and mathematical methods for processing arrays of multidimensional information, including the method of the principal components. The difference between the proposed approach and existing methods is that the former does not require a highly accurate determination of the content of certain components in biological media but proposes to use an array of sensors where each sensor responds to the presence of several components of the analyzed medium at once. The resulting collection of multidimensional data requires modern mathematical processing. To this end, the method of machine learning is used for data processing: the principal components.

MATERIALS AND METHODS

To solve the problem of monitoring the quality ion composition of breast milk, a design was developed and the main units of the intelligent sensor system were tested [4]. It was proposed to use electrochemical electrodes based on polymer plasticized potentiometric membranes as sensors [5]. Polyvinyl chloride served as the polymeric basis for all membranes used. Di-2-ethylhexyl sebacate, o-nitrophenyloctyl ether, and 2-fluorophenyl-2-ityrophenyl ether were used as solvent-plasticizers.

The intelligent sensor system consists of two main units. The measuring unit includes sample preparation modules, sensor and microprocessor measuring modules. The information unit includes training, pattern recognition, and visualization modules. A block diagram of the sensor system prototype is shown in Fig. 1.

The sample preparation module contains a device for installing sensors in the medium under study, its

thermostating, and its mixing to ensure the uniformity of its composition far and near the surface of the sensors.

Fig. 1. Intelligent sensor system block diagram

The sensor module is an array of polyselective electrochemical sensors with cross-sensitivity to biologically important components.

The training and recognition module is a mathematical model that implements the functions of training the system and recognizing multidimensional "patterns" formed by the sensor module in the form of arrays of EMF values.

EXPERIMENTAL RESEARCH

At the preparatory stage of the studies, the compositions of working solutions for calibration, conditioning, storage of sensors, and assessment of their cross-sensitivity, as well as methods for preparing sensors for measurement, assessment of their characteristics in control solutions, were developed.

Studies were conducted on fourteen female subjects during lactation. Nineteen samples of ultrapasteurized and whole cow's milk were examined in order to evaluate and demonstrate the performance of the intelligent sensory system in terms of the possibility of obtaining multiattributive models (digital images) of the tested milk samples and their visual representation. 7 potentiometric polyselective sensors (H^+ , Na^+ , K^+ , Cl^- , NH_4^+ , F^- , pH) with cross-sensitivity were used.

DATA PROCESSING

Building digital images

The visual representation of the study results for the two most typical subjects, one of whom had a viral infection within the last month, is presented in Fig. 2 as "images" of their breast milk — heptahedrons with rays emanating from the center to the intersection points of the faces. The beam length at the intersection points of the faces corresponds to the result of measuring the potential generated by each polyselective electrode.

Fig. 2. "Digital images" of breast milk of a healthy woman (a) and a woman who suffered a viral disease in the last month (б)

Also, "digital images" of breast milk from women who suffered from a breast infection associated with childbearing during lactation were obtained. Examples of "digital images" of the test subjects' breast milk over time are presented in Fig. 3. A change in milk condition was observed before and after taking antibacterial therapy.

Fig. 3. Visual representation of the "digital image" of breast milk of a woman with an infectious breast disease before receiving antibacterial therapy (a) and after receiving therapy (б)

The results of the studies show that the "digital image" of breast milk of each of the subjects in a healthy state, formed by the composition of potentials generated by 7 electrochemical sensors, has its own individual characteristics. Diseases modify it. It has been found that the "digital images" of breast milk of women who have had diseases are significantly different from the diagrams of breast milk of healthy people.

The capabilities of the studied sensory system to form individual "images" of the breast milk of the subjects, revealed in the experimental studies, were used to form algorithms for teaching the sensory system to recognize the functional state of the mother–newborn system.

Principal Component Method

Two tables of the form "objects – features" were formed, in which the rows correspond to the objects of measurement, and the columns correspond to the features, i.e., the recorded numerically standardized readings of each of the seven electrochemical sensors.

The first table was compiled for breast milk samples, and the second table contained data obtained from the analysis of ultrapasteurized and whole cow's milk.

On the basis of these tables, two 7-dimensional (based on the number of measured features) matrices were determined, on each of the axes of which characteristic values were plotted. At the next stage of information analysis, since each dot-object in the matrix is described by a vector with a high (7) dimensionality, measures were taken to reduce the dimensionality of the data space with minimal loss of information content [6].

In addition, the task of visualizing multidimensional data was given. For its implementation, the principal components analysis (PCA) was used, which is traditionally used to store the maximum amount of information about the data set in the minimum number of variables, reducing the dimension of space [7]. With the help of PCA, one can reduce the number of properties by choosing the most variable of them. To do this, using the scikit-learn library (an open source package from the Python ecosystem), the following

algorithm of actions is performed: standardization of the original data range, calculation of the covariance matrix for the original data, calculation of the eigenvalues and eigenvectors of the covariance matrix for the transition to new variables — principal components (PC). The algorithm selects such weights for the principal components so that PC1 and PC2 have the largest selective dispersion and do not correlate with each other [8].

Initially, the number of principal components is equal to the number of initial variables (features). In addition, the sum of their sample dispersions is 100%, which means that all the principal components together accurately describe the total dispersion of the initial variables [9]. The visualization of the proportion of explained variance by different components is shown in Fig. 4.

Fig. 4. Contributions of each component to the overall variability of the input data

As a result of this analysis, we were able to visualize the data obtained in the space of the first two principal components (PC1, PC2), since they have a maximum sample variance and describe the largest part of the data set — 73.1% of the original data. The result is shown in Fig. 5. Each tested biological medium (breast or cow's milk) is characterized by a two-dimensional point containing information about its initial features, so that the quality of the sample can be assessed depending on its location relative to the formed clusters.

Fig. 5. "Digital images" of the biological environments of breast and cow's milk in projection onto the plane of the first two principal components of the electrochemical sensor data array. The X-axis is the first principal component, and the Y-axis is the second principal component. Clusters: 1 — breast milk, 2 — whole milk, 3 — ultrapasteurized milk

Fig. 5 shows the "digital images" of the biological environments of breast and cow's milk in the plane projection of the first two principal components. Cluster labeled with 1 — breast milk, 2 — whole milk, 3 — ultrapasteurized milk.

The following trends were revealed during the study:

1. In biological environments, there is a tendency to group, which indicates their similarity according to certain criteria.

2. The groups of whole and ultra-pasteurized milk are very different both from each other and from breast milk, which is visually displayed as three dis-

tinct clusters of dots in the space of the first two principal components.

CONCLUSION

A layout of an intelligent sensory system for forming an image of biological media based on the analysis of output signals from an array of polyselective sensors with cross-sensitivity was developed, manufactured, and tested. Experimentally, it has been shown that the "digital image" of breast milk from each of the subjects in a healthy state has its own individual characteristics. Diseases modify it. It has been established that the "digital images" of breast milk of women who have undergone disease are significantly different from the "digital images" of breast milk of healthy women.

The use of projection methods to build a "digital image" of biological environments is quite promising and allows one to get a result in a simple and visual form of dots on the plane of the first two principal components. The possibility of ranking milk is shown by similarity groups.

The results of the studies demonstrate the high efficiency of a new methodological approach to solving the problems of identification and analysis of the state of complex multicomponent biological media, namely the qualitative ion composition of breast milk, based on new intellectual methods in electrochemical analysis. The intelligent sensor system presented in this paper can be used to create a new generation of diagnostic medical systems.

REFERENCES

1. Kislyakova L.P. *Dinamika formirovaniya vodno-solevogo sostava moloka*. Avtoref. dis. d-ra biolog. nauk. [Dynamics of milk water-salt composition formation. Autoref. Dr. Biologist. sci. dis.], Saint Petersburg State University Publ., 1996. 33 p. (In Russ.).
2. Lawrence P.B. Breast milk: best source of nutrition for term and preterm infants. *Pediatric Clinics of North America*, 1994, vol. 41, is. 5, pp. 925–941. DOI: 10.1016/S0031-3955(16)38839-3
3. Walker A. Breast milk as the gold standard for protective nutrients. *The Journal of pediatrics*, 2010, vol. 156, is. 2, pp. S3–S7. DOI: 10.1016/j.jpeds.2009.11.021
4. Kislyakova L.P., Bulyanitsa A.L., Kislyakov Yu.Ya., Gulyaev V.I. [Estimation of a people's functional condition after physical activities based on the indicators of the exhaled air condensate registered by polyselective electrochemical sensors with using the projective methods of the multidimensional analysis]. *Nauchnoe Priborostroyeniye* [Scientific Instrumentation], 2016, vol. 26, no. 2, pp. 37–47. (In Russ.). DOI: 10.18358/np-26-2-i3747

5. Pechenkina I.A., Mikhelson K.N. Materials for the ionophore-based membranes for ion-selective electrodes: Problems and achievements. *Russian Journal of Electrochemistry*, 2015, vol. 51, no. 2, pp. 93–102. DOI: 10.1134/S1023193515020111
6. Tenenev V.A., Shaura A.S. [Application of data dimensionality reduction methods to the construction of fuzzy neural networks]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve* [Intelligent systems in manufacturing], 2020, vol. 18, no. 4, pp. 109–116. (In Russ.). DOI: 10.22213/2410-9304-2020-4-109-116
7. Bondarev A.E., Galaktionov V.A. [Investigation of multi-dimensional data in multivariable optimization problems]. *Novye informatsionnye tekhnologii v avtomatizirovannykh sistemakh* [New Information Technologies in Automated Systems], 2013, no. 16, pp. 84–92. (In Russ.).
8. Esbensen K.H. *Multivariate Data Analysis – in practice*. CAMO Sosftware, 5th Edition, Oslo, 2010. 597 p.
9. Jolliffe I.T. Principal component analysis for special types of data. *Principal component analysis*, Springer, New York, 2002, pp. 338–372. DOI: 10.1007/0-387-22440-8_13

Contacts: Zaitceva Anna Yurievna,
anna@da-24.ru

Article received by the editorial office on 24.09.2022