

ИССЛЕДОВАНИЯ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ /
RESEARCH ACTIVITY OF YOUNG SCIENTISTS

Научная статья / *Original article*

УДК 637.07

DOI: 10.31208/2618-7353-2026-34-72-83

**РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ
НА ОСНОВЕ МАССИВА СЕНСОРОВ
С ПРИМЕНЕНИЕМ МНОГОМЕРНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ
ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА МЯСНОГО СЫРЬЯ**

***DEVELOPMENT OF AN ELECTROCHEMICAL SYSTEM
BASED ON AN ARRAY OF SENSORS
WITH THE APPLICATION OF MULTIVARIATE DATA ANALYSIS
FOR THE ASSESSMENT OF MEAT RAW MATERIAL QUALITY***

Андрей Э. Митенков^{1,2}, студент

Мария С. Мазинг², младший научный сотрудник

Анна Ю. Зайцева^{2,3}, кандидат физико-математических наук

Andrew E. Mitenkov^{1,2}, Student

Mariia S. Mazing², Junior Researcher

Anna Yu. Zaitceva^{2,3}, PhD (Phys.–Math.)

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²Институт аналитического приборостроения Российской академии наук, Санкт-Петербург

³Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет
имени Ж.И. Алферова Российской академии наук

¹*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia*

²*Institute for Analytical Instrumentation of the Russian Academy of Science, St. Petersburg, Russia*

³*Alferov Federal State Budgetary Institution of Higher Education and Science
Saint Petersburg National Research Academic University
of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia*

Контактное лицо: Митенков Андрей Эдуардович, ¹студент, Институт электроники и телекоммуникаций, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого; 195251, Россия Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, лит. Б; ²инженер лаборатории, лаборатория медико-аналитических методов и приборов, Институт аналитического приборостроения РАН; 198095, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 31-33, лит. А.;
e-mail: mitenkovandrej@yandex.ru; тел.: 8(921) 886-30-38; ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3143-0264>.

Для цитирования: Митенков А.Э., Мазинг М.С., Зайцева А.Ю. Разработка электрохимической системы на основе массива сенсоров с применением многомерного анализа данных для оценки качества мясного сырья // Аграрно-пищевые инновации. 2026. Т. 34. № 2. С. 72-83. <https://doi.org/10.31208/2618-7353-2026-34-72-83>.

Principal Contact: Andrew E. Mitenkov, ¹Student, Institute of Electronics and Telecommunications, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; lit. B, 29, Polytechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation; ²Engineer of the Laboratory, Laboratory of Medical Analytical Methods and Instruments, Institute for Analytical Instrumentation of RAS; lit. A, 31-33, Ivana Chernyh St., St. Petersburg, 198095, Russian Federation; e-mail: mitenkovandrej@yandex.ru; tel.: +7(921) 886-30-38; ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3143-0264>.

For citation: Mitenkov AE, Mazing MS, Zaitceva AYU. Development of an electrochemical system based on an array of sensors with the application of multivariate data analysis for the assessment of meat raw material quality. *Agrarno-pishchevye innovacii = Agrarian-and-food innovations*. 2026;34(2):72-83. (In Russ.). <https://doi.org/10.31208/2618-7353-2026-34-72-83>.

Резюме

Цель. Разработка измерительной электрохимической системы, обеспечивающей одновременную регистрацию откликов массива сенсоров, и создание на ее основе метода оценки качества мясного сырья с формированием цифрового образа исследуемой среды на основе многомерного статистического анализа данных.

Материалы и методы. Исследование выполнено с использованием разработанной измерительной системы, представляющей собой многоканальный потенциометр, объединяющий массив ионоселективных электродов (Ca^{2+} , K^+ , Na^+ , Mg^{2+} , Cl^- , F^-), pH-электрод и электрод сравнения. Образцы мясного сырья подготавливались в виде водных суспензий, после чего регистрировались отклики сенсорного массива, формирующие многомерные векторы данных, рассматриваемые как цифровые образы образцов. Полученные данные визуализировались с использованием радиальных диаграмм и подвергались математической обработке. Для выявления закономерностей и снижения размерности применялся метод главных компонент, а для разделения и классификации образцов использовался метод опорных векторов.

Результаты. Разработанная измерительная система обеспечила одновременную регистрацию потенциометрических сигналов всех сенсоров массива. Использование независимых измерительных каналов позволило каждому электроду регистрировать собственный потенциал без взаимного влияния, а реализованные усиление, фильтрация и аналого-цифровое преобразование обеспечили формирование цифровых данных для последующей компьютерной обработки. Формируемые многомерные отклики позволяют получать цифровые образы образцов, чувствительные к изменениям их химического состава. На основе зарегистрированных потенциометрических сигналов формировались численные массивы данных и их визуальные профили, отражающие совокупный отклик сенсорного массива. Показана возможность различения мясного сырья по степени свежести и рецептурным характеристикам. Анализ в пространстве главных компонент выявил различия между исследуемыми группами образцов, а классификация методом опорных векторов обеспечила их разделение и распознавание новых образцов.

Выводы. Разработанная измерительная система и реализованный на ее основе подход показали потенциал для экспресс-оценки качества мясного сырья. Обеспечивается получение повторяемого многомерного отклика, отражающего совокупность физико-химических характеристик продукта, и выявление отклонений от эталонного состояния. Предложенное решение является перспективным для практического применения в системах оперативного контроля качества в пищевой промышленности.

Ключевые слова: электрохимический анализ; потенциометрия; электронный язык; мясное сырье; контроль качества; многомерный анализ данных; экспресс-анализ

Abstract

Purpose. This study presents the development of a compact electrochemical system enabling the simultaneous acquisition of responses from a sensor array, as well as a method for assessing the quality of meat raw materials based on the formation of a digital profile of the analyzed medium using multivariate statistical analysis.

Material and Methods. The study was carried out using a developed measurement system, which is a multichannel potentiometer integrating an array of ion-selective electrodes (Ca^{2+} , K^+ , Na^+ , Mg^{2+} , Cl^- , F^-), a pH electrode, and a reference electrode. Meat samples were prepared as aqueous suspensions, after which responses of the sensor array were recorded, forming multidimensional data vectors interpreted as digital representations of the samples. The obtained data were visualized using radar plots and processed using statistical methods. Principal component analysis was applied for pattern recognition and dimensionality reduction, while support vector machines were used for classification and separation of samples.

Results. *The developed measurement system enabled the simultaneous acquisition of potentiometric signals from all sensors in the array. The use of independent measurement channels allowed each electrode to record its own potential without mutual interference, while the implemented signal amplification, filtering, and analog-to-digital conversion ensured the generation of digital data for subsequent computer processing. The obtained multidimensional responses enable the formation of digital representations of samples that are sensitive to changes in their chemical composition. Based on the recorded potentiometric signals, numerical datasets and corresponding visual profiles reflecting the overall response of the sensor array were constructed. The results demonstrate the ability to distinguish meat raw materials according to freshness level and formulation characteristics. Analysis in the principal component space revealed differences between the studied groups of samples, while classification using the support vector machine method ensured their separation and identification of new samples.*

Conclusion. *The developed measurement system and the proposed approach demonstrated strong potential for rapid assessment of meat raw material quality. The system ensures the acquisition of reproducible multivariate responses reflecting the overall set of physicochemical characteristics of the product, as well as reliable detection of deviations from the reference state. The proposed solution is promising for practical application in real-time quality control systems in the food industry.*

Keywords: *electrochemical analysis; potentiometry; electronic tongue; meat raw materials; quality control; multivariate data analysis; rapid analysis*

Введение. Обеспечение стабильного контроля качества и своевременного выявления фальсификации мясного сырья и мясных полуфабрикатов является одной из задач современной пищевой промышленности [1; 2]. Под качеством в данном контексте понимается совокупность физико-химических характеристик продукции, определяющих ее соответствие технологическим регламентам и потребительским ожиданиям.

Современные методы оценки качества мясного сырья отличаются высокой точностью и информативностью, однако их применение осложнено трудоемкостью, необходимостью лабораторного оборудования и участия специалистов. Дополнительно требуются длительная пробоподготовка и значительные временные и финансовые затраты, что ограничивает их использование для оперативного производственного контроля [3; 4].

Одним из таких направлений является создание систем типа «электронный язык» — мультисенсорных аналитических устройств, основанных на использовании массива сенсоров и последующей обработке многомерных сигналов методами статистического анализа и машинного обучения [5; 6]. В отличие от традиционных электрохимических методов, ориентированных на определение конкретных показателей, концепция электронного языка предполагает формирование интегрального отклика сенсорного массива на многокомпонентную среду, что позволяет формировать его цифровой образ, отражающий характерные особенности состава и состояния продукта.

В научной литературе, начиная с 2020 года, широко представлены исследования, посвященные применению различных инструментальных методов и сенсорных технологий для оценки качества пищевых продуктов, включая мясное сырье [7; 8; 9]. Вместе с тем работы, в которых используется массив электрохимических сенсоров в сочетании с алгоритмами машинного обучения и реализуется подход, близкий к концепции «электронного языка», встречаются значительно реже. Таким образом, разработка системы, объединяющей измерительный модуль с набором сенсоров и инструменты многомерного анализа данных для формирования цифрового отклика исследуемой среды, представляет научный интерес и требует дальнейшей проработки.

Актуальность разработки электронного языка для анализа мясной продукции обусловлена сложностью и вариабельностью ее химического состава. Мясная продукция содержит большой набор ионов, обусловленный как естественным минеральным составом (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , F^- , и др.), так и технологическими добавками, прежде всего поваренной солью ($NaCl$), которая используется для регулирования вкусовых характеристик и консервирующего эффекта [11; 12; 13; 14].

Целью данного исследования стала разработка компактной электронной системы анализа мясной продукции, обеспечивающей одновременное определение нескольких параметров ее химического состава.

Материалы и методы. Экспериментальные исследования были проведены на базе Института аналитического приборостроения РАН (г. Санкт-Петербург). Метод исследования основан на сочетании массива потенциометрических сенсоров, объединенных с помощью разработанного измерительного модуля, специального штатива, конструкция которого объединяет кювету, систему магнитного перемешивания и фиксацию сенсоров, и методов интеллектуального анализа данных. Схематично метод представлен на рисунке 1.

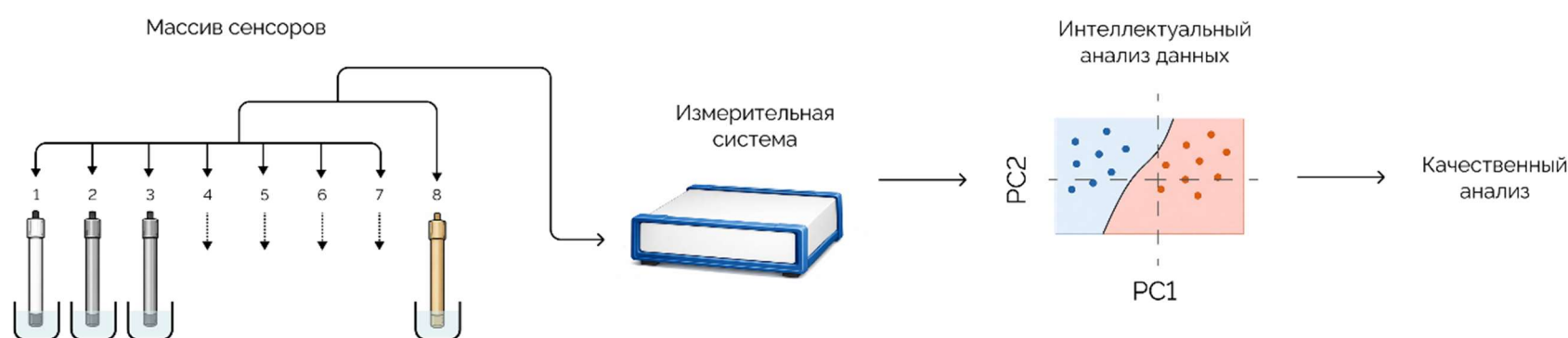


Рисунок 1. Схема работы системы, где: 1 – pH-электрод; 2-7 – остальные электроды, 8 – электрод сравнения

Figure 1. Schematic Diagram of the System: 1 – pH Electrode; 2-7 – Remaining Electrodes; 8 – Reference Electrode

Теоретической основой работы потенциометрических сенсоров является уравнение Нернста, устанавливающее связь между потенциалом обратимого электрода и активностью соответствующего иона в растворе [14]. Согласно данному соотношению, величина измеряемой электродвижущей силы определяется логарифмической зависимостью от концентрации анализируемого компонента и может быть рассчитана по формуле 1:

$$E = E_0 + S_t \lg(a) \quad (1)$$

где E – разность потенциалов между измерительным и вспомогательным электродами (ЭДС), мВ; E_0 – значение ЭДС электродной системы в начальной точке диапазона измерений, мВ; S_t – угловой коэффициент наклона электродной функции, $\lg(a)$ – десятичный логарифм активности иона.

Отдельно вводится величина pX , определяемая по формуле 2 как отрицательный десятичный логарифм активности иона [14]:

$$pX = -\lg(a) \quad (2)$$

где pX – безразмерная величина, характеризующая концентрацию соответствующего иона в растворе.

Для стандартизации измерений эксперимента была разработана методика, которая обеспечивает последовательное выполнение подготовки образцов, измерений и анализ полученных данных. Пробу мясного сырья массой около 50 г при комнатной температуре взвешивали в емкости объемом 1000 см³, добавляли 450 см³ дистиллированной воды. Далее смесь перемешивали с использованием системы магнитного перемешивания на высокой скорости в течение 1-2 минут до получения однородной суспензии.

Поскольку каждое измерение представляло собой многомерный отклик массива потенциометрических сенсоров, для анализа образцов в многомерном пространстве и выявления скрытых закономерностей применялся метод главных компонент. Он преобразует исходные данные в ортогональное пространство, где каждая главная компонента является линейной комбинацией исходных переменных. Первая компонента описывает максимальную дисперсию, последующие отражают ее уменьшающуюся часть. Это позволяет снизить размерность с минимальной потерей информации и представить образцы в виде точек в пространстве, что упрощает анализ их структуры, сходств и различий [15; 16].

Для решения задачи классификации и группировки образцов использовался метод опорных векторов [17]. Классификация выполнялась в пространстве главных компонент, полученном на предыдущем этапе. В указанном пространстве метод формирует оптимальную разделяющую гиперплоскость между классами таким образом, чтобы максимизировать зазор между ближайшими точками различных классов. Такой подход позволяет различать новые образцы и выявлять отклонения от эталонных состояний на основе их многомерных сенсорных откликов.

Для оценки работоспособности разработанной системы была сформирована выборка образцов мясного сырья. В качестве эталонных использовались десять образцов свежего говяжьего фарша без добавок. Для моделирования процессов порчи анализировались три образца говяжьего фарша, хранившиеся в холодильнике более пяти суток. Кроме того, в исследование были включены восемь образцов свежего комбинированного фарша с внесением пищевых добавок – поваренной соли и черного перца в количестве 0,7 и 0,4 г соответственно, что соответствует нормативной рецептурной закладке. Для оценки способности системы выявлять отклонения от стандартной рецептуры дополнительно исследовались восемь образцов комбинированного фарша с повышенным содержанием соли и перца (2,0 и 0,51 г соответственно), моделирующих пересоленное и переперченное сырье.

В подготовленную суспензию погружался массив потенциометрических сенсоров, подключенных к измерительному модулю. Регистрация сигналов осуществлялась с использованием разработанного программного обеспечения на персональном компьютере. Общее время одного измерительного цикла, включая стабилизацию потенциалов, не превышало 50 минут.

Результаты и обсуждение. В ходе экспериментальных исследований были получены массивы потенциометрических откликов измерительного модуля для каждого анализируемого образца мясной продукции.

Формирование массива потенциометрических сенсоров осуществлялось с учетом химического состава мясного сырья как сложной многокомпонентной системы. Для анализа мясной продукции были включены ионоселективные потенциометрические электроды, обеспечивающие регистрацию катионов и анионов, таких как Ca²⁺, K⁺, Na⁺, Mg²⁺, Cl⁻ и F⁻. Дополнительно использовались рН-электрод для регистрации кислотности среды и электрод сравнения, обеспечивающий стабильность потенциометрических измерений. Такой набор позволил сформировать информативный отклик исследуемой среды.

Получение многомерного отклика обеспечивалось разработанным измерительным модулем, который представляет собой многоканальный потенциометр, используемый для изме-

рения электродвижущей силы путем сравнения потенциала индикаторных электродов с потенциалом электрода сравнения. Каждый канал модуля функционирует независимо, что обеспечивает возможность одновременной регистрации откликов всех сенсоров массива. На входе каждого измерительного канала реализован согласующий усилительный каскад, что позволяет корректно регистрировать потенциалы сенсоров без искажения измеряемой ЭДС. Дополнительно в структуре канала предусмотрена фильтрация низких частот, направленная на подавление внешних помех и повышение стабильности измерений. Преобразование аналоговых сигналов в цифровую форму осуществляется с использованием аналого-цифрового преобразователя, обеспечивающего низкий уровень шума, что является важным для регистрации малых изменений потенциалов. Полученные цифровые данные считываются микроконтроллером, который передает их на персональный компьютер для последующей обработки и анализа. Конструктивно измерительный модуль выполнен в защитном корпусе, обеспечивающем устойчивость к воздействию внешней среды.

Благодаря этому обеспечивалось получение стабильных сигналов, на основе которых для каждого образца формировались численные массивы данных, включающие значения электродвижущей силы (ЭДС) и соответствующие им величины рХ, рассчитанные для каждого измерительного канала. Полученные результаты были структурированы и сведены в табличную форму для последующей статистической обработки и сравнительного анализа.

Для удобства проведения измерений был разработан специальный штатив, включающий в себя систему магнитного размешивания пробы, кювету и крепление для параллельного применения сенсоров. Кювета оснащена съемной крышкой с отверстиями, создавая дополнительную устойчивость при проведении измерений. Штатив был изготовлен с помощью аддитивных технологий из пластика на основе полиэтилентерефталата, обладающего высокой химической стойкостью, ударопрочностью и термостойкостью. Модель изготовленного штатива, а также внешний вид экспериментальной установки, используемой для проведения измерений, представлены на рисунке 2.

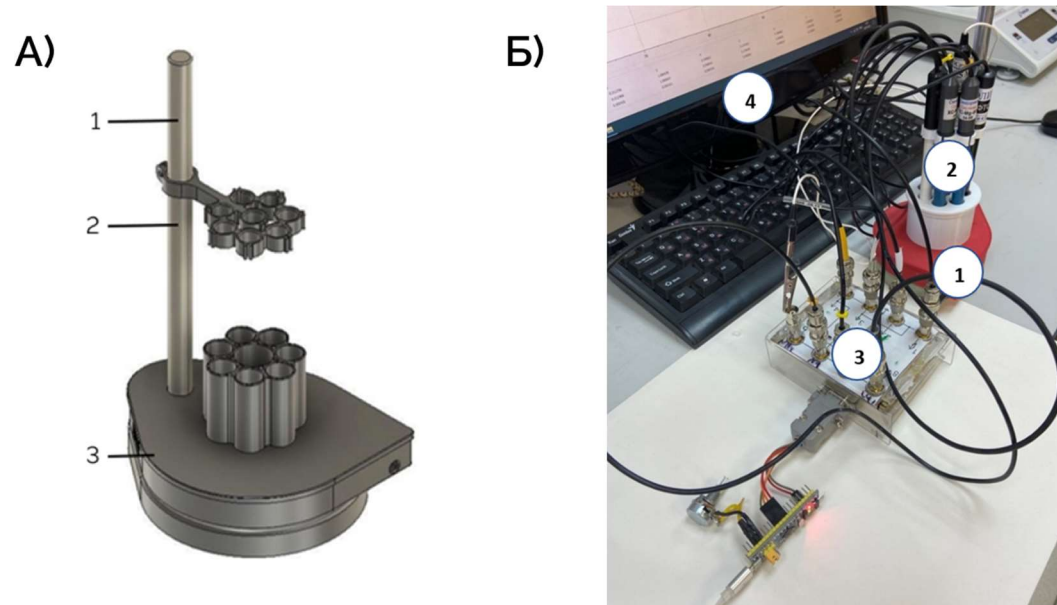


Рисунок 2. Цифровая 3D модель разработанного штатива (А), где: 1 – стойка штатива; 2 – крепление 8 электродов; 3 – система магнитного размешивания
Прототип системы (Б), где: 1 – система пробоподготовки; 2 – сенсорный модуль; 3 – измерительный модуль; 4 – персональный компьютер, выполняющий роль вычислительного модуля

Figure 2. Digital 3D Model of the Developed Stand (A): 1 – Stand Post; 2 – Mount for Eight Electrodes; 3 – Magnetic Stirring System
Prototype of the System (B): 1 – Sample Preparation System; 2 – Sensor Module; 3 – Measuring Module; 4 – Personal Computer Serving as the Computing Module

Сформированные с помощью описанной аппаратной части сигналы подвергались дальнейшей программной обработке с использованием программного обеспечения Excel и среды программирования R. На этапе предварительной обработки в Excel выполнялось усреднение экспериментальных данных с использованием медианных значений, что позволяло снизить влияние выбросов. Для наглядного представления совокупного отклика сенсорного массива каждого образца строились радиальные диаграммы (профилограммы), где каждая ось соответствовала отдельному сенсору, а длина радиуса – нормализованному значению соответствующего сигнала, усредненному по серии измерений для каждой группы образцов. Нормализация проводилась с целью приведения откликов различных сенсоров к сопоставимому масштабу и обеспечения корректного визуального сравнения профилей, что позволяет формировать цифровой «отпечаток» состава многокомпонентной среды. Стандартизированные цифровые профили эталонного и отличающегося от эталона образцов представлены на рисунке 3.

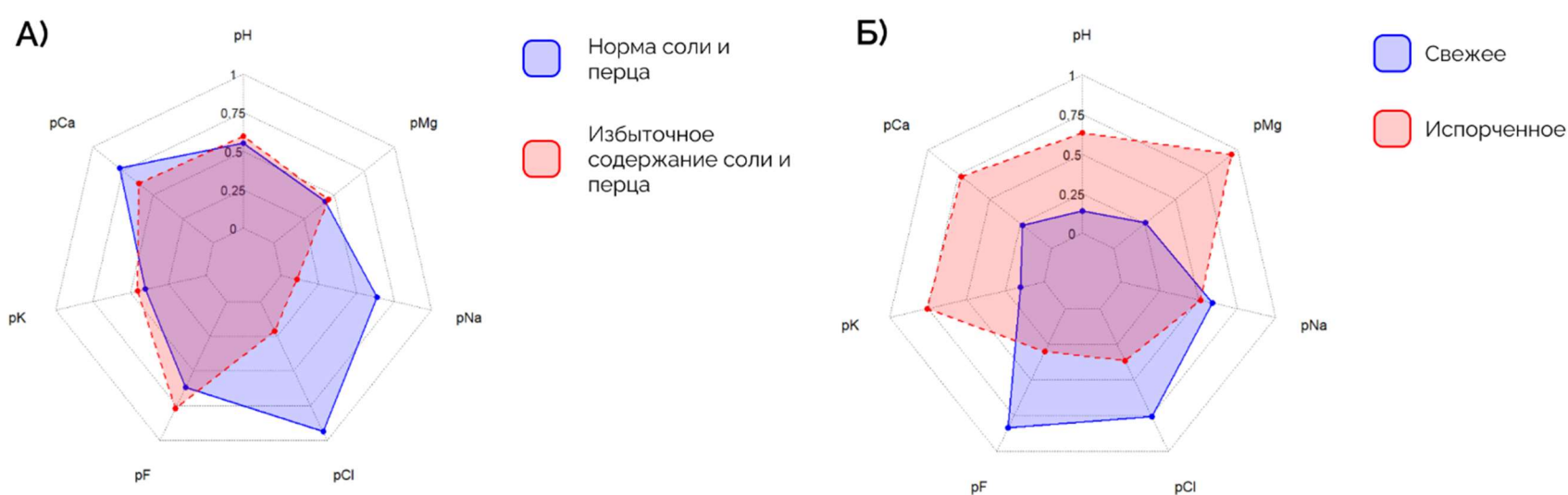


Рисунок 3. Визуальные цифровые образы (профилограммы) образцов мясного сырья:

(А) свежий (синий) и несвежий говяжий фарш (красный);

(Б) свежий комбинированный фарш с нормой закладки соли и перца (синий), свежий пересоленный и переперченный комбинированный фарш (красный)

Figure 3. Visual Digital Patterns (Profilograms) of Meat Raw Material Samples:

(A) Fresh Mince (Blue) and Stale (Red) Mince Sample;

(B) Fresh Mince with Standard Salt and Pepper Content (Blue), Fresh Oversalted and Overpeppered Mince (Red)

Несмотря на наглядность радиальных диаграмм, при увеличении числа исследуемых образцов их визуальное сопоставление становится затруднительным. Для наглядного представления структуры данных в пространстве главных компонент и формального разделения образцов на группы использовалось сочетание метода главных компонент с методом опорных векторов. Результат анализа и классификации с нанесенной разделяющей границей представлен на рисунках 4 и 5, что позволяет наглядно оценить корректность разделения классов и структуру распределения образцов в пространстве главных компонент.

Полученные результаты подтверждают, что измерительная система формирует повторяемый и чувствительный к изменениям состава среды цифровой отклик мясной продукции. Разработанный подход не ориентирован на определение одного конкретного показателя, а основан на регистрации отклика набора сенсоров. Такой принцип соответствует концепции «электронного языка», при которой анализируется совокупный цифровой образ среды.

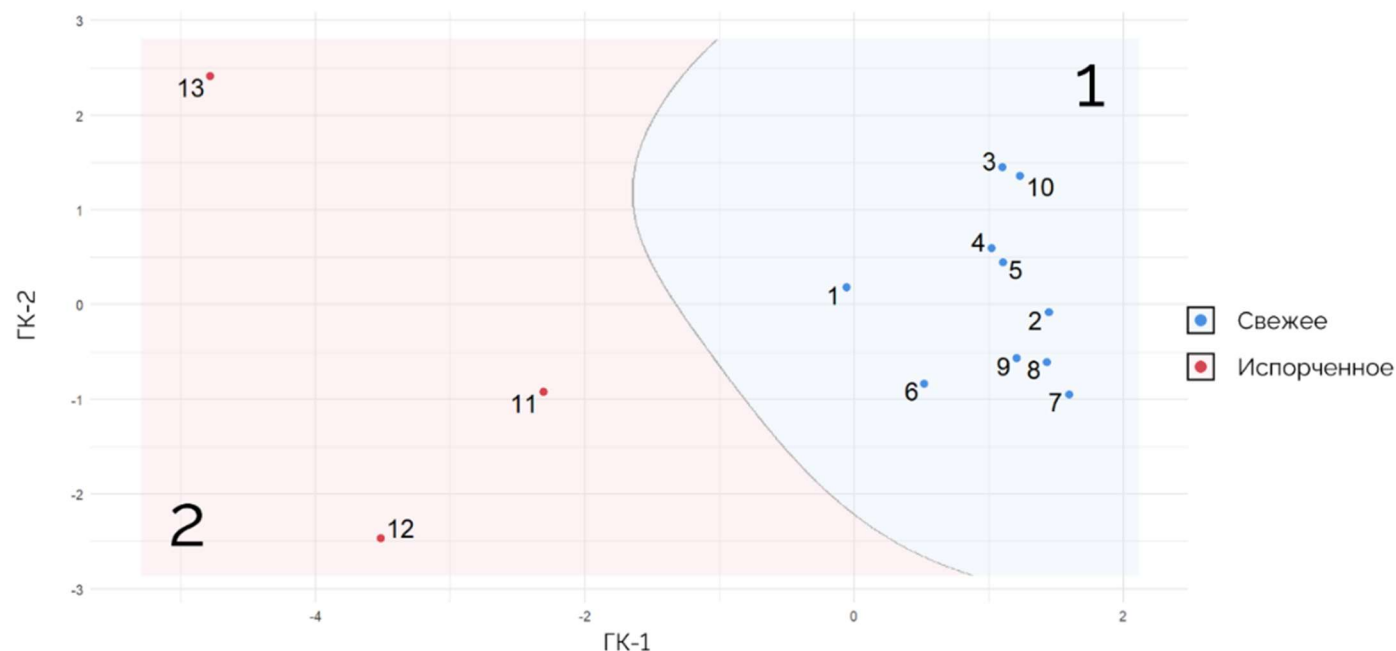


Рисунок 4. Результат разделения методом опорных векторов в пространстве главных компонент: свежие (1) и несвежие (2) образцы
Figure 4. Result of Separation by Support Vector Machine in Principal Component Space: Fresh (1) and Stale (2) Mince Samples

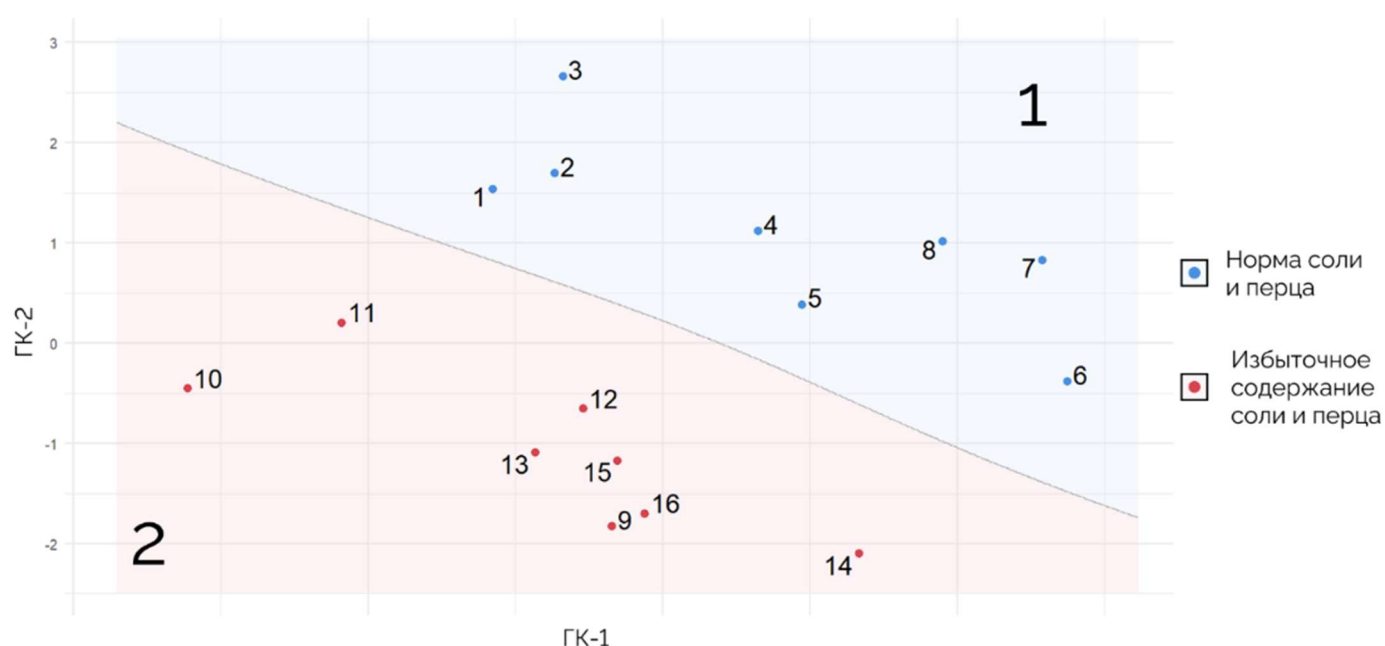


Рисунок 5. Результат разделения методом опорных векторов в пространстве главных компонент: фарш с нормой закладки соли и перца (1) и пересолённый и переперченный фарш (2)
Figure 5. Result of Separation by Support Vector Machine in Principal Component Space: Mince with Standard Salt and Pepper Content (1) and Oversalted and Overpeppered Mince (2)

Анализ радиальных диаграмм показал, что процессы порчи, а также изменения содержания добавленных компонентов сопровождаются изменением формы и площади формируемых цифровых образов. При этом геометрия профилограмм может рассматриваться как качественная характеристика мясной продукции, поскольку она отражает совокупное влияние изменений химического состава и физико-химических параметров среды. Степень отклонения геометрических параметров от соответствующего эталонного профиля позволяет судить о наличии и характере изменений свойств анализируемых образцов. Например, при длительном хранении мясного сырья наблюдался рост значений pCa и pMg , а также изменения от-

кликов других сенсоров, что обусловлено процессами порчи продукта и разрушением клеточных структур, или же при повышенном содержании соли на профилограммах отмечалось снижение значений pNa и pCl , что соответствует увеличению концентрации соответствующих ионов в растворе.

Применение метода главных компонент позволило перейти от геометрического сопоставления профилей к анализу распределения объектов в пространстве главных компонент, где свежие образцы формировали компактное облако точек, что свидетельствует о стабильности их электрохимических характеристик и повторяемости цифрового отклика. Образцы с признаками порчи, а также с рецептурными отклонениями располагались вне этой области, что указывает на различие их многомерных характеристик. В результате свежие образцы, а также образцы со стандартной рецептурой могут рассматриваться как эталонная группа.

Для разделения классов был применен метод опорных векторов, построенный в пространстве главных компонент. Алгоритм формирует разделяющую границу между эталонными и отклоняющимися образцами, опираясь на наиболее близкие к границе точки. Такое представление позволяет не только визуально наблюдать разделение групп, но и использовать его как основу для автоматизированной классификации.

Заключение. Представленный метод подтвердил перспективность применения разработанной измерительной системы на основе массива электрохимических сенсоров для оперативной оценки качества мясного сырья и полуфабрикатов.

Экспериментальные результаты показали, что предложенная система способна регистрировать изменения, связанные как с процессами порчи мясного сырья, так и с отклонениями содержания соли и перца. Использование методов многомерного анализа данных обеспечило разделение образцов по качественному состоянию и подтверждение возможности формирования эталонных областей для последующего сравнения с неизвестными пробами.

К основным преимуществам разработанного подхода относятся компактность измерительного модуля, возможность параллельной регистрации сигналов по нескольким химическим элементам и ионным формам, а также быстрота получения аналитического результата относительно стандартных электрохимических исследований. Это делает систему перспективной для использования в задачах экспресс-контроля качества на предприятиях пищевой промышленности.

Дальнейшие направления исследований связаны с расширением набора сенсоров и увеличением числа регистрируемых химических параметров, оптимизацией алгоритмов машинного обучения для повышения точности классификации. Перспективным является формирование расширенных баз цифровых образов различных видов мясного сырья и продуктов переработки, что позволит расширить область применения системы в пищевой промышленности.

Список источников

1. Li Y.C., Liu S.Y., Meng F.B., Liu D.Y., Zhang Y., Wang W., Zhang J.M. Comparative review and the recent progress in detection technologies of meat product adulteration // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 2020. Vol. 19(4). P. 2256-2296. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12579>.
2. Haider A., Iqbal S.Z., Bhatti I.A., Alim M.B., Waseem M., Iqbal M., Mousavi Khaneghah A. Food authentication, current issues, analytical techniques, and future challenges: A comprehensive review // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 2024. Vol. 23(3). Article number: e13360. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13360>.

3. Wang X., Hu F., Jin J., Huang Y., Zhu X., Dong Y., Wang C., Wu D. A non-destructive detection method for evaluating beef taste quality based on electrochemical PVC membrane sensor // *LWT*. 2022. Vol 154(15). Article number: 112666. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112666>.
4. Nanda P.K., Bhattacharya D., Das J.K., Bandyopadhyay S., Ekhlās D., Lorenzo J.M., Dandapat P., Alessandroni L., Das A.K., Gagaoua M. Emerging role of biosensors and chemical indicators to monitor the quality and safety of meat and meat products // *Chemosensors*. 2022. Vol. 10(8). Article number: 322. <https://doi.org/10.3390/chemosensors10080322>.
5. Titova T., Nachev V. "Electronic tongue" in the food industry // *Food Science and Applied Biotechnology*. 2020. Vol. 3(1). P. 71-76. <https://doi.org/10.30721/fsab2020.v3.i1.74>.
6. Munekata P.E., Finardi S., de Souza C.K., Meinert C., Pateiro M., Hoffmann T.G., Domínguez R., Bertoli S.L., Kumar M., Lorenzo J.M. Applications of electronic nose, electronic eye and electronic tongue in quality, safety and shelf life of meat and meat products: A review // *Sensors*. 2023. Vol. 23(2). Article number: 672. <https://doi.org/10.3390/s23020672>.
7. Wu X., Liang X., Wang Y., Wu B., Sun J. Non-destructive techniques for the analysis and evaluation of meat quality and safety: A review // *Foods*. 2022. Vol. 22(11). Article number: 3713. <https://doi.org/10.3390/foods11223713>.
8. Pereira P.F., de Sousa Picciani P.H., Calado V., Tonon R.V. Electrical gas sensors for meat freshness assessment and quality monitoring: A review // *Trends in Food Science & Technology*. 2021. Vol. 118. P. 36-44. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.08.036>.
9. Rebezov M., Khayrullin M., Assenova B., Farida S., Baydan D., Garipova L., Savkina R., Rodionova S. Improving meat quality and safety: innovative strategies // *Slovak Journal of Food Sciences*. 2024. Vol. 18. P. 523-546. <https://doi.org/10.5219/1972>.
10. Vicente F., Pereira P.C. Pork meat composition and health: a review of the evidence // *Foods*. 2024. Vol. 13(12). Article number: 1905. <https://doi.org/10.3390/foods13121905>.
11. Falowo A.B. A comprehensive review of nutritional benefits of minerals in meat and meat products // *Sci. Lett.* 2021. Vol. 9(2). P. 55-64. <https://doi.org/10.47262/SL/9.2.132021010>.
12. Patel N., Bergamaschi M., Magro L., Petrini A., Bittante G. Relationships of a detailed mineral profile of meat with animal performance and beef quality // *Animals*. 2019. Vol. 12(9). Article number: 1073. <https://doi.org/10.3390/ani9121073>.
13. Zanardi E., Ghidini S., Conter M., Ianieri A. Mineral composition of Italian salami and effect of NaCl partial replacement on compositional, physico-chemical and sensory parameters // *Meat Science*. 2010. Vol. 86(3). P. 742-747. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2010.06.015>.
14. Wilson D. Chemical sensors for farm-to-table monitoring of fruit quality // *Sensors*. 2021. Vol. 21(5). Article number: 1634. <https://doi.org/10.3390/s21051634>.
15. Yuan Y., Chen X. Vegetable and fruit freshness detection based on deep features and principal component analysis // *Current Research in Food Science*. 2024. № 8. Article number: 100656. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2023.100656>.
16. Zeng J., Guo Y., Han Y., Li Z., Yang Z., Chai Q., Wang W., Zhang Y., Fu C. A review of the discriminant analysis methods for food quality based on near-infrared spectroscopy and pattern recognition // *Molecules*. 2021. Vol. 26(3). Article number: 749. <https://doi.org/10.3390/molecules26030749>.
17. Aarsalane A., El Barbri N., Tabyaoui A., Klilou A., Rhofir K., Halimi A. An embedded system based on DSP platform and PCA-SVM algorithms for rapid beef meat freshness prediction and identification // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2018. Vol. 152. P. 385-392. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.07.031>.

References

1. Li YC, Liu SY, Meng FB, Liu DY, Zhang Y, Wang W, Zhang JM. Comparative review and the recent progress in detection technologies of meat product adulteration. *Comprehensive Reviews in Food science and Food safety*. 2020;19(4):2256-2296. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12579>.
2. Haider A, Iqbal SZ, Bhatti IA, Alim MB, Waseem M, Iqbal M, Mousavi Khaneghah A. Food authentication, current issues, analytical techniques, and future challenges: A comprehensive review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2024;23(3):e13360. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13360>.
3. Wang X, Hu F, Jin J, Huang Y, Zhu X, Dong Y, Wang C, Wu D. A non-destructive detection method for evaluating beef taste quality based on electrochemical PVC membrane sensor. *LWT*. 2022;(154):112666. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112666>.
4. Nanda PK, Bhattacharya D, Das JK, Bandyopadhyay S, Ekhlās D, Lorenzo JM, Dandapat P, Alessandrini L, Das AK, Gagaoua M. Emerging role of biosensors and chemical indicators to monitor the quality and safety of meat and meat products. *Chemosensors*. 2022;10(8):322. <https://doi.org/10.3390/chemosensors10080322>.
5. Titova T, Nachev V. "Electronic tongue" in the food industry. *Food Science and Applied Biotechnology*. 2020;3(1):71-76. <https://doi.org/10.30721/fsab2020.v3.i1.74>.
6. Munekata PE, Finardi S, de Souza CK, Meinert C, Pateiro M, Hoffmann TG, Domínguez R, Bertoli SL, Kumar M, Lorenzo JM. Applications of electronic nose, electronic eye and electronic tongue in quality, safety and shelf life of meat and meat products: A review. *Sensors*. 2023;23(2):672. <https://doi.org/10.3390/s23020672>.
7. Wu X, Liang X, Wang Y, Wu B, Sun J. Non-destructive techniques for the analysis and evaluation of meat quality and safety: A review. *Foods*. 2022;22(11):3713. <https://doi.org/10.3390/foods11223713>.
8. Pereira PF, de Sousa Picciani PH, Calado V, Tonon RV. Electrical gas sensors for meat freshness assessment and quality monitoring: A review. *Trends in Food Science & Technology*. 2021;(118):36-44. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.08.036>.
9. Rebezov M, Khayrullin M, Assenova B, Farida S, Baydan D, Garipova L, Savkina R, Rodionova S. Improving meat quality and safety: innovative strategies. *Slovak Journal of Food Sciences*. 2024;(18):523-546. <https://doi.org/10.5219/1972>.
10. Vicente F, Pereira PC. Pork meat composition and health: a review of the evidence. *Foods*. 2024;13(12):1905. <https://doi.org/10.3390/foods13121905>.
11. Falowo AB. A comprehensive review of nutritional benefits of minerals in meat and meat products. *Sci. Lett.* 2021;9(2):55-64. <https://doi.org/10.47262/SL/9.2.132021010>.
12. Patel N, Bergamaschi M, Magro L, Petrini A, Bittante G. Relationships of a detailed mineral profile of meat with animal performance and beef quality. *Animals*. 2019;12(9):1073. <https://doi.org/10.3390/ani9121073>.
13. Zanardi E, Ghidini S, Conter M, Ianieri A. Mineral composition of Italian salami and effect of NaCl partial replacement on compositional, physico-chemical and sensory parameters. *Meat Science*. 2010;86(3):742-747. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2010.06.015>.
14. Wilson D. Chemical sensors for farm-to-table monitoring of fruit quality. *Sensors*. 2021;21(5):1634. <https://doi.org/10.3390/s21051634>.
15. Yuan Y, Chen X. Vegetable and fruit freshness detection based on deep features and principal component analysis. *Current Research in Food Science*. 2024;(8):100656. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2023.100656>.

16. Zeng J, Guo Y, Han Y, Li Z, Yang Z, Chai Q, Wang W, Zhang Y, Fu C. A review of the discriminant analysis methods for food quality based on near-infrared spectroscopy and pattern recognition. *Molecules*. 2021;26(3):749. <https://doi.org/10.3390/molecules26030749>.
17. Arsalane A, El Barbri N, Tabyaoui A, Klilou A, Rhofir K, Halimi A. An embedded system based on DSP platform and PCA-SVM algorithms for rapid beef meat freshness prediction and identification. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2018;(152):385-392. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.07.031>.

Вклад авторов: Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: All authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

Конфликт интересов. Авторы заявляют, что никакого конфликта интересов в связи с публикацией данной статьи не существует.

Conflict of interest. The authors declare that there is no conflict of interest in connection with the publication of this article.

Информация об авторах (за исключением контактного лица):

Мазинг Мария Сергеевна – младший научный сотрудник, лаборатория медико-аналитических методов и приборов, Институт аналитического приборостроения РАН; 198095, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 31-33, лит. А.; e-mail: mazmari@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1739-9671>;

Зайцева Анна Юрьевна – ¹старший научный сотрудник, заведующая лабораторией, лаборатория медико-аналитических методов и приборов, Институт аналитического приборостроения РАН; 198095, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 31-33, лит. А.; ²и.о. заведующего кафедрой, кафедра биоинформатики и математической биологии, Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алфёрова РАН; 194021, г. Санкт-Петербург, ул. Хлопина, д. 8, корп. 3, лит. А; e-mail: anna@da-24.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0334-2770>.

Information about the authors (excluding the contact person):

Mariia S. Mazing – Junior Researcher, Laboratory of Medical Analytical Methods and Instruments, Institute for Analytical Instrumentation RAS; lit. A, 31-33, Ivana Chernyh St., St. Petersburg, 198095, Russian Federation; e-mail: mazmari@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1739-9671>;

Anna Yu. Zaitceva – ¹Senior Researcher, Head of the Laboratory, Laboratory of Medical Analytical Methods and Instruments, Institute for Analytical Instrumentation of RAS; lit. A, 31-33, Ivana Chernyh St., St. Petersburg, 198095, Russian Federation; ²Acting Head of the Department, Department of Bioinformatics and Mathematical Biology, Alferov Federal State Budgetary Institution of Higher Education and Science Saint Petersburg National Research Academic University of RAS; lit. A, building 3, 8, Khlopina St., St. Petersburg, 194021, Russian Federation; e-mail: anna@da-24.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0334-2770>.

Статья поступила в редакцию / The article was submitted: 14.05.2026;
одобрена после рецензирования / approved after reviewing: 17.07.2026;
принята к публикации / accepted for publication: 20.07.2026