ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 543.27-8

Применение мультисенсорной системы для формирования цифровых отпечатков порчи пищевых продуктов в задачах агропромышленного комплекса

М.М. Сябро, М.К. Суханов, Н.В. Лимаренко, М.О. Голубенко, Е.А. Щербакова
Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Аннотация
Представлены результаты формирования цифровых отпечатков летучих органических соединений, выделяемых коровьим молоком в процессе порчи, с использованием мультисенсорной системы на основе полупроводниковых сенсоров серии MQ. Актуальность исследования обусловлена необходимостью создания доступных инструментов экспресс-диагностики, отвечающих задачам импортозамещения и интеллектуализации контроля качества пищевых продуктов и воздушной среды в агропромышленном комплексе. В качестве тестовой модели использовано молоко, для которого выделены три характерные стадии порчи: свежее состояние, начальная стадия скисания и глубокая порча. На основе полученных данных сформированы цифровые отпечатки для каждого состояния коровьего молока, визуализированные в виде лепестковых диаграмм. Установлено, что каждая стадия характеризуется уникальной геометрической конфигурацией, что позволяет использовать получаемые диаграммы для автоматической классификации состояния продукта. Практическая значимость метода подтверждается возможностью его применения для экспресс-идентификации стадий порчи коровьего молока в процессе хранения и транспортировки.

Ключевые слова: мультисенсорная система, электронный нос, полупроводниковые сенсоры, цифровой отпечаток, контроль качества, экспресс-анализ

Для цитирования. Сябро М.М., Суханов М.К., Лимаренко Н.В., Голубенко М.О., Щербакова Е.А. Применение мультисенсорной системы для формирования цифровых отпечатков порчи пищевых продуктов в задачах агропромышленного комплекса. *Молодой исследователь Дона*. 2026;11(3):58–62.

Using a Multisensor System for Generating Digital Footprints of Spoiled Food Products to Solve the Objectives of Agro-Industrial Complex

Margarita M. Syabro, Maksim K. Sukhanov, Nikolai V. Limarenko, Maria O. Golubenko, Elena A. Shcherbakova
Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Abstract
The results of generating digital footprints of volatile organic compounds released by cow milk during spoilage using a multisensor system based on MQ series of semiconductor sensors have been presented. The relevance of the study is underpinned by the need to create the accessible rapid diagnostic tools that meet the challenges of import substitution and smartification of food and air quality control in the agro-industrial complex. Milk was chosen as a test model, and three characteristic stages of its spoilage were determined: fresh stage, initial stage of milk souring and deep spoilage stage. Based on the obtained data, digital footprints were generated for each stage of cow milk spoilage and visualized in the form of radar charts. It has been established that each stage is characterized by a unique geometric configuration, allowing the resulting charts to be used for automatic classification of product conditions. The practical significance of the method is confirmed by its applicability for rapid identification of spoilage stages in cow milk during storage and transportation.

Keywords: multisensor system, electronic nose, semiconductor sensors, digital footprint, quality control, rapid test

For Citation. Syabro MM, Sukhanov MK, Limarenko NV, Golubenko MO, Shcherbakova EA. Using a Multisensor System for Generating Digital Footprints of Spoiled Food Products to Solve the Objectives of Agro-Industrial Complex. *Young Researcher of Don.* 2026;11(3):58–62.

https://mid-journal.ru

© Сябро М.М., Суханов М.К., Лимаренко Н.В., Голубенко М.О., Щербакова Е.А., 2026

Введение. Вопросы контроля качества пищевых продуктов, мониторинга воздушной среды в животноводческих помещениях и обеспечения экологической безопасности относятся к числу приоритетных направлений реализации государственной политики в сфере развития агропромышленного комплекса Российской Федерации. Правовое регулирование указанных направлений осуществляется в соответствии с Доктриной продовольственной безопасности Российской Федерации (утв. Указом Президента РФ от 21.01.2020 № 20) и Стратегией развития агропромышленного и рыбохозяйственного комплексов Российской Федерации на период до 2030 года (Распоряжение Правительства РФ от 8 сентября 2022 г. № 2567-р).

Традиционные методы контроля качества пищевой продукции, включая газовую хроматографию и масс-спектрометрию, характеризуются высокой точностью, однако требуют сложной пробоподготовки, использования дорогостоящего оборудования и привлечения высококвалифицированного персонала, что существенно ограничивает возможности их применения в режиме непрерывного мониторинга в логистических центрах и животноводческих помещениях. Практика показывает, что для решения задач экспресс-оценки свежести продукции и контроля состава воздушной среды более перспективным представляется использование мультисенсорных систем типа «электронный нос». Показана возможность создания мультисенсорных систем типа «электронный нос» на основе стандартных датчиков [1] и их применения для идентификации летучих органических соединений, выделяемых пищевыми продуктами, в частности для определения качества мясных продуктов [2], состава колбасных изделий [3], хлебобулочной продукции [4], молочных продуктов [5], а также рыбы [6]. Вместе с тем существующие решения не в полной мере учитывают необходимость коррекции показаний в условиях переменного микроклимата, характерного для рефрижераторов и животноводческих помещений. Несмотря на широкий круг исследований в области анализа газовых сред, включая работы по формированию и визуализации аналитического сигнала [7], анализу динамики сигналов мультисенсорной системы [8], исследованию ее производительности при решении задач экологического мониторинга [9], а также обработке данных и получению новой информации на основе многомерных сигналов [10], в настоящее время сохраняется дефицит систематизированных сведений о формировании паттернов откликов, соответствующих различным стадиям порчи пищевых продуктов, на основе доступных сенсорных элементов.

Таким образом, актуальность исследования обусловлена необходимостью создания доступного инструмента экспресс-диагностики состояния пищевых продуктов и воздушной среды, отвечающего задачам импортозамещения и интеллектуализации контроля.

Цель исследования — разработка метода формирования цифровых отпечатков летучих органических соединений, выделяемых пищевыми продуктами в процессе порчи, на основе применения мультисенсорной системы, включающей полупроводниковые сенсоры.

Материалы и методы. Объектом исследования являются летучие органические соединения, выделяемые пищевыми продуктами в процессе хранения и порчи. Предмет исследования — паттерны откликов мультисенсорной системы, соответствующие различным стадиям порчи молока.

Концептуальной основой работы является «электронный нос» — мультисенсорная система, реализующая механизмы, аналогичные обонятельной системе млекопитающих. Принцип ее действия основан на том, что каждая газовая среда формирует уникальный паттерн откликов массива сенсоров, который после соответствующей обработки позволяет идентифицировать состояние объекта. Для регистрации откликов использована конфигурация экспериментального стенда, включающая массив из четырех полупроводниковых сенсоров серии MQ и датчик температуры и влажности DHT22, предназначенный для коррекции показаний. Сенсор MQ-2 предназначен для детекции пропана, метана и дыма, MQ-3 чувствителен к парам спирта и этанолу, MQ-136 ориентирован на выявление сероводорода, MQ-137 реагирует на аммиак. Блок-схема экспериментального стенда представлена на рис. 1.

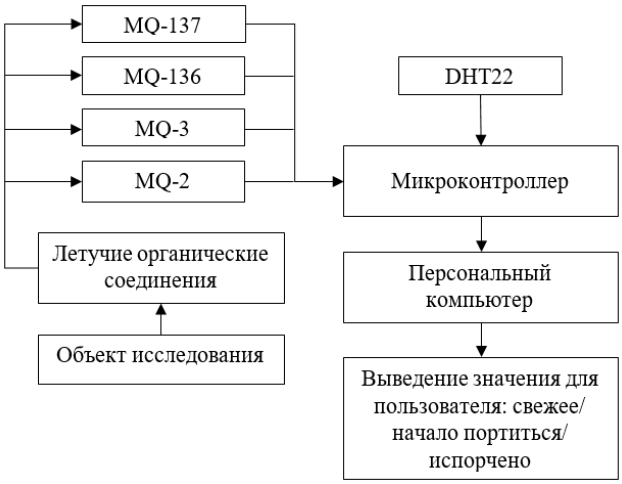

Рис. 1. Блок-схема экспериментального стенда

https://mid-journal.ru

Для обеспечения устойчивости формируемых паттернов к аппаратным погрешностям и воздействию внешних факторов применяется метод представления сигналов в процентах от фонового значения, полученного при калибровке на чистом воздухе. Данный подход позволяет нивелировать разброс характеристик отдельных датчиков и компенсировать влияние температуры и влажности, что имеет принципиальное значение при эксплуатации системы в реальных условиях, в частности в автомобильных рефрижераторах и животноводческих помещениях с переменным микроклиматом [11].

Результаты и обсуждение. В качестве тестового объекта выбрано коровье молоко. Выделены три характерные стадии его порчи: свежее состояние, начальная стадия скисания (молочнокислое брожение), глубокая порча (распад белков). В ходе проведённого исследования сформированы цифровые отпечатки трёх стадий порчи молока на основе концентраций целевых газов, полученных с использованием мультисенсорного массива (таблица 1). Для каждой стадии установлены диапазоны концентраций (ppm) газов, регистрируемых каждым сенсором в соответствии с его чувствительностью к целевым компонентам газовой среды.

Таблица 1

Показания датчиков при разных степенях порчи коровьего молока

Сенсор	Целевые газы	Чувствительность (ppm)	Свежее молоко (ppm)	Начало скисания (ppm)	Прокисшее молоко (ppm)
MQ-2	Пропан, метан, дым	200–5 000	0	5–15	15–50
MQ-3	Пары спирта, этанол	25–5 000	0	50–200	200–1000
MQ-136	Сероводород (H_2S)	1–200	0	50–200	1–20
MQ-137	Аммиак (NH_3)	5–500	0	0–5	5–100

Свежее молоко характеризуется концентрациями детектируемых газов ниже минимального порога чувствительности используемых сенсоров, что не позволяет однозначно зарегистрировать их присутствие. Начальная стадия скисания, обусловленная молочнокислым брожением, сопровождается увеличением концентрации этанола до 50–200 ppm при незначительном содержании углеводородов и фоновых значениях сероводорода и аммиака. Прокисшее молоко формирует сложный цифровой отпечаток, характеризующийся максимальными концентрациями этанола (200–1000 ppm), а также появлением аммиака (5–100 ppm) и сероводорода (1–20 ppm), что связано с распадом белков.

Для наглядного представления различий между стадиями порчи молока были построены лепестковые диаграммы, отражающие значения откликов газовых датчиков, выраженные в процентах от фонового уровня (рис. 2).

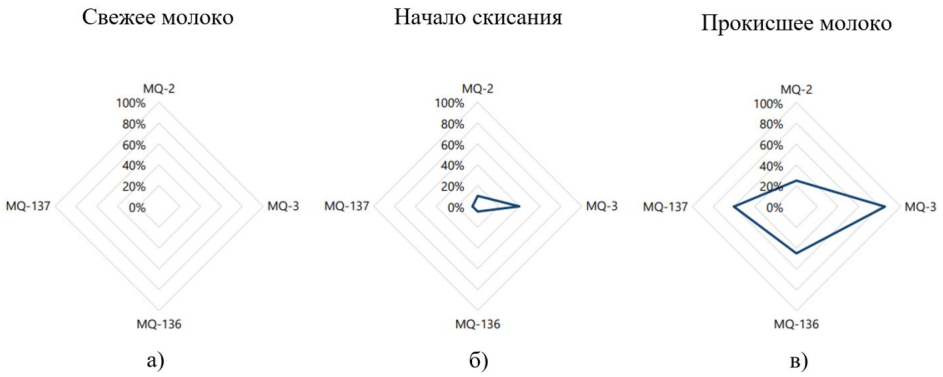

Рис. 2. Цифровые отпечатки различных стадий порчи молока

На рис. 2, а представлена лепестковая диаграмма для свежего молока. Все четыре оси имеют нулевые значения, поскольку концентрации летучих соединений находятся ниже порога чувствительности сенсоров.

Лепестковая диаграмма для стадии начала скисания (рис. 2, б) демонстрирует выраженную асимметрию. Наблюдается существенное увеличение концентрации спиртов до 40 % и общее незначительное повышение фоновых значений. Такая форма диаграммы наглядно отражает доминирование процессов молочнокислого брожения, при которых основным маркерным соединением выступает этанол.

Для стадии прокисшего молока (рис. 2, в) характерна наиболее сложная конфигурация лепестковой диаграммы. Значения по всем четырём осям достигают существенных величин. Графически это выражается в виде развёрнутой фигуры, занимающей наибольшую площадь среди всех рассмотренных состояний. Такая форма диаграммы отражает сложный состав газовой среды, обусловленный одновременным протеканием процессов брожения и распада белков, сопровождающихся выделением этанола, аммиака и сероводорода.

Полученные визуальные паттерны могут быть использованы для экспресс-идентификации состояния продукта при разработке систем автоматической классификации.

Практическая значимость разработанного метода формирования цифровых отпечатков подтверждается возможностью его применения для экспресс-идентификации стадий порчи коровьего молока в процессе хранения и транспортировки. К преимуществам предложенного подхода относятся автоматизация анализа, высокая скорость получения результата и портативность системы, что соответствует задачам импортозамещения в области интеллектуализации контроля качества и безопасности пищевой продукции.

Заключение. В результате проведённого исследования получены следующие результаты:

– на основе анализа информационных источников и экспериментальных данных сформированы цифровые отпечатки для трёх стадий порчи молока, характеризующиеся уникальными паттернами откликов полупроводниковых сенсоров;

– используемый метод визуализации в виде лепестковых диаграмм позволяет однозначно идентифицировать стадию порчи продукта и может быть использован в качестве основы для систем автоматической классификации;

– определены перспективные области практического применения разработанного подхода, включая пищевую промышленность, логистику, животноводство и экологический мониторинг.

Перспективы дальнейших исследований связаны с экспериментальной валидацией получаемых значений, уточнением характеристик сенсорного массива применительно к решаемым задачам, а также с интеграцией алгоритмов машинного обучения для автоматической классификации состояний на основе формируемой базы цифровых отпечатков.

Список литературы

1. Мартынюк Ю.П., Подосенов М.А. Электронный нос на базе стандартных датчиков газа. Актуальные проблемы теории и практики электрохимических процессов. В: *Сборник материалов V Международной научной конференции молодых ученых, Энгельс, 25–28 апреля 2023 года.* Энгельс: Энгельсский технологический институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»; 2023. С. 178–181.

2. Козырев И.А. Мультисенсорная система «электронный нос» для определения качества мясных продуктов в процессе хранения. *Пищевые системы*. 2021;4(3S):116–121. URL: https://vniimp.ru/netcat_files/928/1173/Pischevye_sistemy_3S_2021_28_Kozyrev_Ok_Pravki.pdf (дата обращения: 05.03.2026).

3. Лисицын А.А., Ревуцкая Н.М. Сравнительное исследование аромата сосисок с добавлением и без добавления красителя бетанина с помощью электронного носа. Пищевые инновации и биотехнологии. В: *Сборник тезисов XIII Всероссийской (национальной) научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Кемерово, 21 апреля 2025 года.* Кемерово: Кемеровский государственный университет; 2025. С. 280–282.

4. Зюзина С.С., Щелкова М.Д., Рысмухамбетова Г.Е., Вавилова Н.И., Кучменко Т.А. и др. Использование мультисенсорной системы «электронный нос» для определения аромата безглютенового бисквита с добавлением кэроба. *Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК — продукты здорового питания*. 2024;(4):32–39. https://doi.org/10.24412/2311-6447-2024-4-32-39

5. Образцова Д.В., Глотова И.А., Кучменко Т.А., Умарханов Р.У. Применение методологии «Электронный нос» для исследования равновесной газовой фазы сливочного масла. В: *Труды 76-й национальной научно-практической конференции студентов и магистрантов «Молодежный вектор развития аграрной науки», Воронеж, 14 февраля – 31 марта 2025 года.* Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет; 2025. С. 20–24.

6. Дворянинова О.П., Соколов А.В., Ряднов С.С. Использование мультисенсорной системы "электронный нос" для оценки качества мяса тилапии различных производителей. Продовольственная безопасность: научное, кадровое и информационное обеспечение. В: *Сборник научных статей и докладов VII Международной научно-практической конференции, Воронеж, 10 декабря 2020 года.* ВГУИТ. Воронеж: Воронежский государственный университет инженерных технологий; 2021. С. 337–343.

7. Шишкин А.В., Юдин Н.А., Кочетова Ж.Ю. Формирование и визуализация аналитического сигнала «электронного носа». Химические проблемы современности 2023. В: *Сборник материалов VII Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Донецк, 16–18 мая 2023 года.* Донецк: Донецкий национальный университет; 2023. С. 42–45.

8. Мигранова В.Р., Стрелкова Е.А., Юмашев Д.С. Анализ динамики «запаховых» сигналов на основе производных токов многоканального «электронного носа». Мавлютовские чтения. В: *Материалы XIX Всероссийской молодёжной научной конференции. В 8-ми томах, Уфа, 24–28 ноября 2025 года.* Уфа: Уфимский университет науки и технологий; 2025. С. 489–492.

9. Сатыбалдина Д., Исайнова А., Альсеитов О. и др. Создание газоаналитической мультисенсорной системы типа «электронный нос» и исследование её производительности для задач Экологического мониторинга. *Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева*. 2023;125(2):315–323. https://doi.org/10.52167/1609-1817-2023-125-2-315-323

10. Копаев А.Ю., Мураховский И.А., Кучменко. Т.А. Интенсификация обработки данных и получение новой информации по многомерным сигналам "электронного носа". *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий.* 2020;82(1):247–251. https://doi.org/10.20914/2310-1202-2020-1-247-251

11. Сябро М.М., Лимаренко Н.В. Обоснование использования электронных ольфактометров при оценке безопасности перевозок пищевых продуктов. Автомобильный транспорт: эксплуатация, сервис, подготовка кадров. В: *Сборник научных статей по материалам Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 95-летию Университета Яковлева, Чебоксары, 17 апреля 2025 года*. Чебоксары: Чувашский государственный педагогический университет им. И.Я. Яковлева; 2025. С. 140–145.

Об авторах:

Маргарита Михайловна Сябро, магистрант кафедры «Приборостроение и биомедицинская инженерия» Донского государственного технического университета (344000, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), syabro.margo@mail.ru

Максим Константинович Суханов, магистрант кафедры «Приборостроение и биомедицинская инженерия» Донского государственного технического университета (344000, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), suhanov_mk@mail.ru

Николай Владимирович Лимаренко, доктор технических наук, профессор кафедры «Приборостроение и биомедицинская инженерия» Донского государственного технического университета (344000, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1)

Мария Олеговна Голубенко, студент кафедры «Приборостроение и биомедицинская инженерия» Донского государственного технического университета (344000, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1)

Елена Алексеевна Щербакова, студент кафедры «Приборостроение и биомедицинская инженерия» Донского государственного технического университета (344000, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1)

***Конфликт интересов*: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Margarita M. Syabro, Master's Degree Student of the Instrument Making and Biomedical Engineering Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344000, Russian Federation), syabro.margo@mail.ru

Maksim K. Sukhanov, Master's Degree Student of the Instrument Making and Biomedical Engineering Department University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344000, Russian Federation), suhanov_mk@mail.ru

Nikolai V. Limarenko, Dr.Sci. (Engineering), Professor of the Instrument Making and Biomedical Engineering Department University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344000, Russian Federation).

Maria O. Golubenko, Student of the Instrument Making and Biomedical Engineering Department University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344000, Russian Federation).

Elena A. Shcherbakova, Student of the Instrument Making and Biomedical Engineering Department University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344000, Russian Federation).

***Conflict of Interest Statement:* the authors declare no conflict of interest.**

All authors have read and approved the final manuscript.