



УДК 621.391.26  
doi: 10.21685/2587-7704-2024-9-1-19



Open  
Access

RESEARCH  
ARTICLE

## Разработка алгоритма работы мультисенсорной системы контроля качества пищевой продукции

**Александр Сергеевич Кирин**

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40  
kirin.sergey@list.ru

**Никита Алексеевич Учьев**

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40  
nekit\_osina@mail.ru

**Антон Сергеевич Ишков**

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40  
ishkovanton@mail.ru

**Аннотация.** Целью работы является исследование методов анализа качества пищевой продукции и разработка на их основе мультисенсорного интеллектуального анализатора с использованием последних достижений технологий. Актуальность заключается в том, что данный алгоритм способен заменить или улучшить способности человека по контролю качества пищевой продукции. Теоретической основой данной работы послужили научные труды, исследования российских ученых в области приборостроения, нанотехнологий, нейросетевой обработки, химической отрасли, качества и безопасности пищевых продуктов. Рассмотрен механизм восприятия запаха и вкуса, а также причины изменения качества продуктов питания в процессе хранения. Проведен сравнительный анализ методов оценивания качества пищевых продуктов. Обоснован метод измерения концентрации газов для оценки ароматических характеристик продовольственных товаров. Сделан выбор и обоснование датчиков газового анализа и разработана структура мультисенсорного анализатора качества пищевых продуктов. Разработан алгоритм работы мультисенсорной системы контроля качества пищевой продукции.

**Ключевые слова:** газовый анализ, запах, сенсор, методы газового анализа, мультисенсорная система, качество пищевой продукции

**Для цитирования:** Кирин А. С., Учьев Н. А., Ишков А. С. Разработка алгоритма работы мультисенсорной системы контроля качества пищевой продукции // Инжиниринг и технологии. 2024. Т. 9 (1). С. 1–7. doi: 10.21685/2587-7704-2024-9-1-19

## Development of an algorithm for the operation of a multisensory food quality control system

**Alexander S. Kirin**

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia  
kirin.sergey@list.ru

**Nikita A. Uchuev**

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia  
nekit\_osina@mail.ru

**Anton S. Ishkov**

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia  
ishkovanton@mail.ru

**Abstract.** The purpose of the work is to study methods for analyzing the quality of food products, and to develop on their basis a multi-sensor intelligent analyzer using the latest advances in technology. The relevance lies in the fact that this algorithm can replace or improve human abilities to control the quality of food products. The theoretical basis of this article was the scientific works and research of Russian scientists in the field of instrument engineering, nanotechnology, neural network processing, the chemical industry, quality and food safety. The mechanism of perception of smell and taste, as well as the reasons for changes in the quality of food



products during storage are considered. A comparative analysis of methods for assessing the quality of food products was carried out. A method for measuring gas concentrations to assess the aromatic characteristics of food products is substantiated. The selection and justification of gas analysis sensors has been made and the structure of a multi-sensor food quality analyzer has been developed. An algorithm for the operation of a multisensory food quality control system has been developed.

**Keywords:** gas analysis, odor, sensor, gas analysis methods, multisensory system, food quality

**For citation:** Kirin A.S., Uchuev N.A., Ishkov A.S. Development of an algorithm for the operation of a multisensory food quality control system. *Inzhiniring i tekhnologii = Engineering and Technology*. 2024;9(1):1–7. (In Russ.). doi: 10.21685/2587-7704-2024-9-1-19

## Введение

Букет различных ароматов, исходящих от пищевой продукции, является одним из методов оценки их качества [1]. Технические характеристики и их параметры газовых и жидкостных хроматографов и масс-спектрометров, применяемых в настоящее время в пищевой промышленности и на предприятиях торговли, свидетельствуют о том, что они могут применяться для оценки запаха пищевых продуктов. У таких способов есть масса недостатков, например, высокая стоимость проведения испытаний, высокая трудоемкость и большая длительность проведения испытаний. В следствие этого в настоящее время является актуальным применение более быстродействующих, с низкой стоимостью приборов для анализа состава аромата пищевой продукции. На сегодняшний день на рынке широко представлены приборы имеющие название «электронный нос», используемые в пищевой промышленности для оценки качества и свойств пищевой продукции [2]. Данный способ анализа запаха лишен имеющихся недостатков газовых и жидкостных хроматографов и масс-спектрометров, это достигается возможностью математической обработки, следствием чего является объективная оценка свежести продуктов.

## Материалы и методы

Составляющим компонентам запаха уделяется особое внимание, потому что клиент заостряет на этом особое внимание при определении качества пищевой продукции. Среднестатистический человек способен определить порядка тысячи различных ароматов, в отличие от профессионала в этом деле, который различает до 17 тысяч. Ароматы более сложной разборчивости обозначают термином «букет», а легкие, нежные и однокомпонентные запахи принято называть «запах» и «аромат». Люди анализируют составляющие компоненты запаха при помощи слизистой оболочки носа, а точнее одорантовых рецепторов.

Обонятельный метод является наиболее популярным и широко применяемым для оценки свежести пищевой продукции. Восприятие запахов органами обоняния – один из видов органолептического метода. Как показывает практика, незначительные составляющие запаха и малейшие его отклонения от эталонного образа имеют значительное влияние на получаемую информацию о качестве пищевой продукции. Сенсорные системы позволяют увидеть наиболее полную картину составляющих спектра аромата, которую не способен получить обычный человек. Процессы, связанные с восприятием запаха, являются наиболее сложными для понятия в физиологии. На данный момент существуют лишь научные гипотезы, которые показывают, как происходит анализ обонятельных рецепторов запаха, единой теории нет. Если взять во внимание человеческие и внешние факторы, например: психофизиологическое состояние, особенности строения носовой полости, врожденные дефекты, концентрацию вещества или длительность его воздействия, состояние окружающей среды, – то можно сделать вывод о том, что не может быть объективного мнения оценки запаха качества пищевой продукции.

Как правило, группа атомов-осмофоров является носителем запаха и обуславливает его, хотя с их увеличением аромат ослабляется, что парадоксально [6]. Сочетания нескольких пахнущих летучих веществ могут как ослаблять, так и усиливать друг друга, а при их смешивании давать совершенно уникальный образ. Предложенная теория о рецепции запаха Монкрифором была разработана Эймуром, который выдвинул тезис о том, что все запахи можно разделить на семь видов [7], которые далее будут представлены в табл. 1. Первоначально Дж. Дэвис выдвинул теорию о зависимости между устройством молекулы пахнущего вещества и устройством хаотичной полости в рецепторе клетки.



Таблица 1

Классификация первичных запахов (по Эймуру)

Первичный запах	Химические соединения	Пример вещества с первичным запахом
1. Камфарный	Камфара, гексахлорэтан	Средство от моли
2. Muskusный	Бутилбензон	Muskus, цибетон
3. Цветочный	Этилкарбинол	Роза, лаванда
4. Мятный	Ментол	Перечная мята
5. Эфирный	Диэтиловый эфир	Чистящее средство
6. Едкий	Муравьиная кислота	Уксус, поджаренные кофейные зерна
7. Гнилостный	Бутилмеркаптан, сероводород	Тухлые яйца

Однако, как выяснилось позже, запах как физиологический феномен может быть рассмотрен двойственно путем дифференцирования на компоненты: на основе элементарных запахов, из «тоналности». В табл. 2 представлена принятая в пищевой промышленности классификация запахов с балльными оценками – дескрипторами.

Таблица 2

Классификация ароматов по психоэмоциональным признакам

Признак	Дескриптор
1. Степень приятности	приятный, нейтральный, неприятный, отталкивающий
2. Теплота	холодный, прохладный, теплый, горячий
3. Свежесть	свежий, нейтральный, затхлый, тухлый
4. Легкость	легкий, нейтральный, тяжелый, давящий
5. Плотность	плотный, едва уловимый
6. Сила	слабый, сильный
7. Мягкость	нежный, мягкий, жесткий
8. Острота	пикантный, острый
9. Вкус	сладкий, горький, кислый

С развитием научно-технического прогресса и с исследованиями в данной области на сегодняшний день имеется возможность создания приборов, реализующих функцию обоняния и вкусовых рецепторов. Минусом таких устройств является постоянная их потребность в обращении к специализированным базам данных образов, следствием чего оказывается не совершенствование и невозможность полной замены ими человеческого носа.

«Электронный нос» представляет собой совокупность сенсоров, взаимодействующих с запахами, реагирующих на компоненты в их составе и создающих «паттерны» данного запаха, сравниваемые с набором заранее заготовленных стандартов [9]. В «электронном языке» реализуется такой же алгоритм, отличие заключается лишь в том, что в качестве исходных данных будут жидкости. Согласно определению «электронного носа» – это объединение из набора химических неселективных сенсоров и средств распознавания входных данных [10]. «Интеллектуальными» системами называют системы, использующие совокупность характеристик тождественной структуры, также они являются альтернативой снятия сигналов от каждого из датчиков.



## Результаты

Авторами предложена структурная схема анализатора качества пищевой продукции, реализующая органолептический метод. Схема устройства включает в себя следующие компоненты (рис. 1): систему пробоотбора для доставки газовой пробы из анализируемого воздушного объема к матрице датчиков, матрицу датчиков, аналоговый преобразователь выходного сигнала датчиков в цифровой код с помощью модуля АЦП E-24, представляющего из себя измерительный блок аналогово-цифрового преобразователя, цифровой контроллер для предварительной обработки сигнала сенсоров и организации стандартного интерфейса для связи с компьютером.

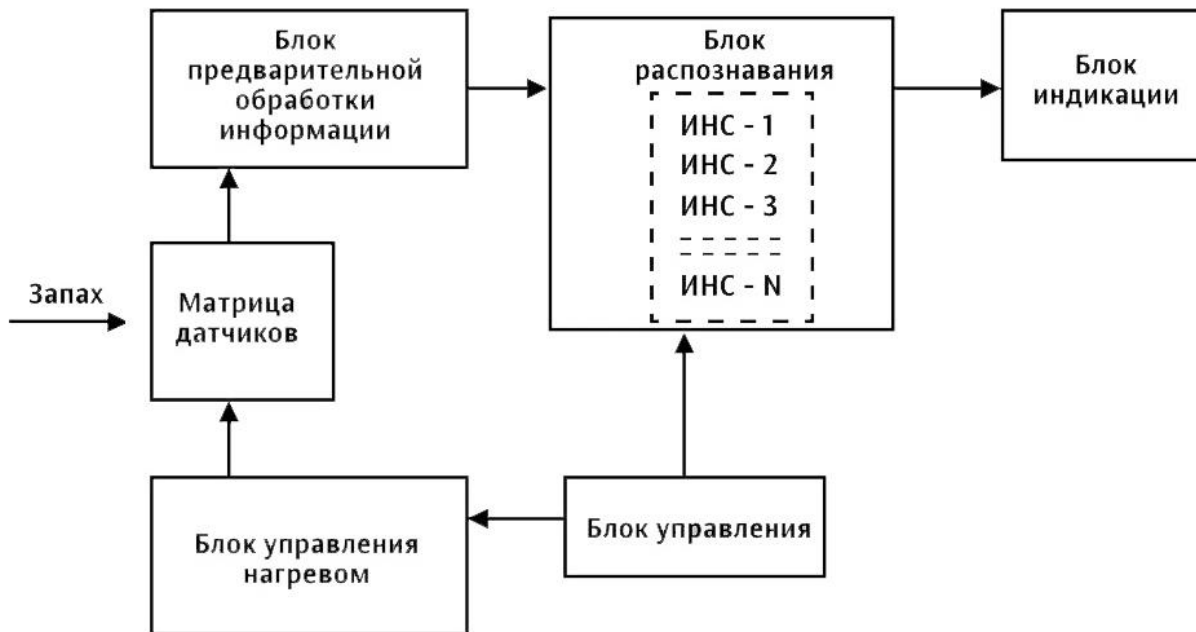


Рис. 1. Структура анализатора качества пищевых продуктов

Анализатор пищевой продукции активируется с помощью запахов, попадающих извне на газо-чувствительный датчик (ГЧД), тем самым осуществляется расчет матрицы. Вследствие увеличения концентрации растворенного вещества у поверхности раздела двух фаз способность проводить электрический ток элементов ГЧД либо увеличивается, либо уменьшается, в зависимости от типа летучего вещества. Каждый ГЧД не может быть избранным ароматом по отношению к любому газу, но способность воздействия на различные газы строго индивидуальна. Массив ГЧД состоит из элементов в количестве 26 элементов. Особый образ аромата складывается из различных чувствительных компонентов ГЧД. Для того, чтобы распознать вещество, через массив прогоняют пары того или иного запаха, после чего происходит отклик массива. Если прогонять через массив друг за другом всевозможные ароматы, то формируется библиотека откликов, которая находится в памяти устройства вычисления. Диагностирование осуществляется методом сравнения отклика, находящегося в библиотеке с откликом, поступившим извне. Если после этого устройство отобразит сигнал, значит, он совпал с тем, что имеется в библиотеке.

Двухслойная нейронная сеть изначально умеет различать 16 ароматов, следовательно, у нее находится 16-битный код на выходе, который имеет одну единицу в одном из 16 разрядов. Если появится несколько единиц, значит, найден новый аромат вещества, тогда неизученный запах загружается в базу данных и для него создается новая нейросеть.

В результате происходит более четкое их определение, а в случае обнаружения базой данных двух вариантов, близких по структуре ароматов, выбирается тот, чей код более точен эталонному коду по расстоянию Хэмминга. Приоритетом является исправление неполадок «электронного носа», вследствие неисправной матрицы датчиков запаха. Для корректной работы данной цепи нужен процесс обучения. Он имеет на входе нейронной сети, имеющие в наличии вариации ароматов. Алгоритм построен следующим образом.

Этап 1. Подготовка к работе вероятных значений весов нейронной сети.

Этап 2. Ввод учебного сета на вход нейронной сети.



Этап 3. Включение нейронной сети в режиме прямого прохода и запись полученной выходной последовательности.

Этап 4. Обнаружение неполадки отклонения (дельта) выходного слоя.

Этап 5. Определение составляющих всех замаскированных слоев.

Этап 6. Повторение шагов 2–9, пока сеть не сможет определить аромат с возможным уровнем среднеквадратичной ошибки.

Проверка нейросети осуществляется на тестовых сетях. Они состоят из конкретных тестовых последовательностей, показывающих результат на входе нейронной сети.

Мультисенсорная система может работать следующим образом:

- 1) тестирование,
- 2) калибровка,
- 3) измерение.

В тестировании находится база данных и осуществляется процесс обучения. Калибровка вносит отклики ароматов для проведения расчетов. Измерение показывает проведенный результат работы данного прибора. На рис. 2 представлена схема алгоритма работы прибора.

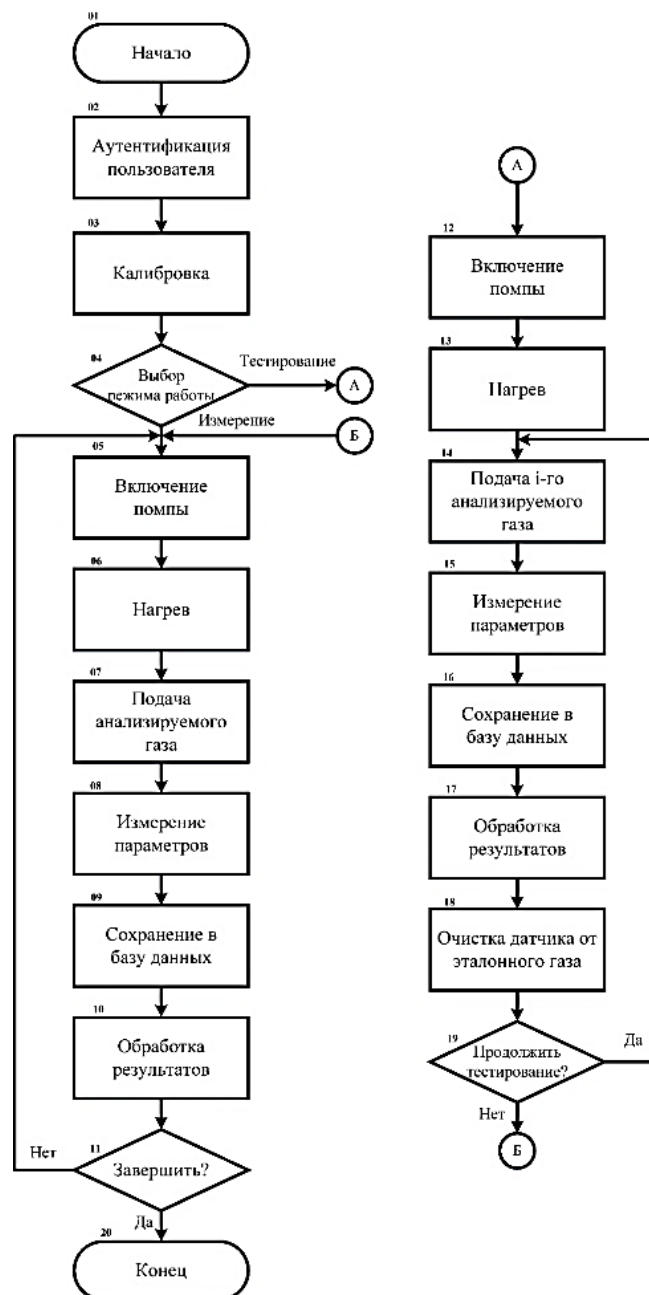


Рис. 2. Алгоритм работы мультисенсорной системы анализа качества продуктов



Для разработки мультисенсорной системы по анализу качества продукта необходимо произвести распознавание и анализ запаха в газовой смеси, на основании которого можно сделать заключение о свежести и пригодности к употреблению выбранного продукта.

Для распознавания запахов было отдано предпочтение графовой нейронной сети (ГНС). Этот тип нейронной сети напрямую работает со структурой графа. Он позволяет использовать в качестве входных данных данные неправильной формы, такие как графы, так как суть распознавания запаха будет основываться на определении структурной формулы химического вещества (продукта).

В начале нейронной сети находится информация, попавшая туда с сенсорных устройств. Длина выходных данных есть количество ароматов, которые должна узнать сеть, плюс один вектор для неизвестного системе запаха.

### Заключение

В качестве данных для обучения нейронной сети в работе были использованы данные ароматических материалов базы GoodScents и данных базы Leffingwell PMP 2001. Каждая молекула сначала характеризуется составляющими атомами, узлами и связями. Рассматривая атомы как узлы, а связи как ребра, химическую формулу можно интерпретировать как граф. Графовые нейронные сети – это обучаемые инвариантные к перестановкам преобразования узлов и ребер, которые производят векторы фиксированной длины, и затем они обрабатываются полносвязной нейронной сетью.

Первоначально каждый узел в графе представлен в виде вектора с использованием предпочтительной функции – идентификации атома, заряда атома и т.д. Затем в циклической форме производится обработка информации, с последовательной передачей данных на последующий слой. Этот процесс заикликивается до тех пор, пока все узлы входного графа не будут представлены единым вектором путем их сложения и приведения к среднему значению. Этот единственный вектор, представляющий всю молекулу, и является основным материалом, описывающим анализируемый запах. Затем нейронная сеть выводит результат описания запаха.

На рис. 3 представлена схема распознавания запаха при помощи графовой нейронной сети – тип нейронной сети, который напрямую работает со структурой графа.

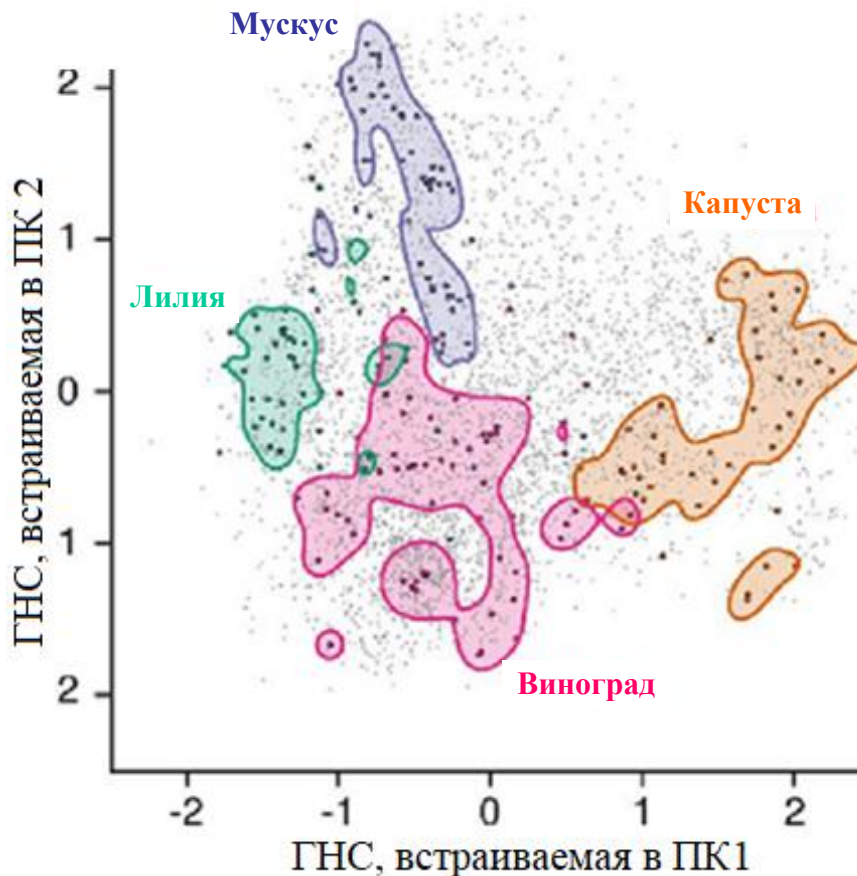


Рис. 3. Пример распознанных запахов



На рис. 3 каждый слой ГНС представлен разными цветами, каждый из которых преобразует функции из предыдущего слоя. Выходные данные последнего слоя ГНС сводятся к вектору, который затем используется для прогнозирования описания запаха. В правой нижней части рис. 3 представлен результат распознанных запахов, которые соответствуют продуктам. Они выделены соответствующим цветом сверху.

### Список литературы

1. Долгополов Н., Яблоков М. Наносенсорная нейрородобная система «Электронный нос». М. : Электроника, 2008. 312 с.
2. Воронин Б. А. Проблемы государственного контроля (надзора) за качеством и безопасностью пищевых продуктов // *Аграрное и земельное право*. 2019. № 7. С. 10–14.
3. Воронин Б. А. Проблемы государственного контроля за качеством и безопасностью пищевых продуктов // *Управленец*. 2017. № 5–6. С. 58–64.
4. Кобаяси Н. Введение в Нанотехнологию. М. : Изд-во Бином, 2015. 170 с.
5. Егоров А. А., Егоров М. А., Царева Ю. И. Химические сенсоры: классификация, принципы работы, области применения. М. : Наука, 2017. 340 с.
6. Ганшин В. М., Чебышев А. В., Фесенко А. В. От обонятельных моделей к «электронному носу». Новые возможности параллельной аналитики // *Специальная техника*. 1999. № 1–2.
7. URL: <https://www.psychology-online.net/articles/doc-1793.html?ysclid=lobo8og7wa623657457>
8. Ратнер М., Ратнер Д. Нанотехнология: простое объяснение очередной гениальной идеи. СПб : Вильямс, 2015. 320 с.
9. Андрияшин Е. А. Сила нанотехнологий: наука & бизнес. М. : Фонд «Успехи физики», 2007. 240 с.
10. Пул Ч., Оуэнс Ф. Нанотехнологии. М. : Техносфера, 2016. 215 с.

### References

1. Dolgoplov N., Jablovkov M. *Nanosensornaja nejropodobnaja sistema «Jelektronnyj nos» = Nanosensory neuropodic system "Electronic nose"*. Moscow: Jelektronika, 2008:312. (In Russ.)
2. Voronin B.A. Problems of state control (supervision) over the quality and safety of food products. *Agrarnoe i zemel'noe parvo = Agrarian and land law*. 2019;(7):10–14. (In Russ.)
3. Voronin B.A. Problems of state control (supervision) over the quality and safety of food products. *Upravlenec = The manager*. 2017;(5–6):58–64. (In Russ.)
4. Kobajasi N. *Vvedenie v Nanotehnologiju = Introduction to Nanotechnology*. Moscow: Izd-vo Binom, 2015:170. (In Russ.)
5. Egorov A.A., Egorov M.A., Careva Ju.I. *Himicheskie sensory: klassifikacija, principy raboty, oblasti primenenija = Chemical sensors: classification, principles of operation, applications*. Moscow: Nauka, 2017:340. (In Russ.)
6. Ganshin V.M., Chebyshev A.V., Fesenko A.V. From olfactory models to the "electronic nose". New features of parallel analytics. *Special'naja tehnik = Special equipment*. 1999;(1–2). (In Russ.)
7. Available at: <https://www.psychology-online.net/articles/doc-1793.html?ysclid=lobo8og7wa623657457>
8. Ratner M., Ratner D. *Nanotehnologija: prostoe objasnenie ocherednoj genial'noj idei = Nanotechnology: a simple explanation for another brilliant idea*. Saint Petersburg: Vil'jams, 2015:320. (In Russ.)
9. Andrjushin E.A. *Sila nanotehnologij: nauka & biznes = The Power of Nanotechnology: Science & Business*. Moscow: Fond «Uspehi fiziki», 2007:240. (In Russ.)
10. Poole Ch., Owens F. *Nanotehnologii = Nanotechnology*. Moscow: Tehnosfera, 2016:215. (In Russ.)

Поступила в редакцию / Received 1.03.2024

Принята к публикации / Accepted 1.04.2024