

Бударина О.В.¹, Скворонская С.А.¹, Гошин М.Е.¹, Сабирова З.Ф.²

Использование сенсорных и аналитических методов в гигиенической оценке запаха в атмосферном воздухе (обзор литературы)

¹ФБУН «Федеральный научный центр гигиены имени Ф.Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора, 141014, Мытищи, Россия;²ФГБУ «Центр стратегического планирования и управления медико-биологическими рисками здоровью» ФМБА России, 119121, Москва, Россия

РЕЗЮМЕ

Вследствие особенностей воздействия на человека запахи окружающей среды до сих пор не регламентированы общепринятыми стандартами, что затрудняет их количественное измерение. Это подчёркивает необходимость исследований, направленных на разработку универсальных критериев оценки запахов, присутствующих в атмосферном воздухе.

Цель работы — обобщение и анализ имеющихся в мировой практике подходов, используемых для оценки запахов в окружающей среде. Поиск источников научной информации проводили в базах данных Scopus, Web of Science, PubMed, Researchgate, РИНЦ, eLIBRARY и Google Scholar за 1999–2024 гг. Согласно проведённому анализу, разнообразные подходы к оценке загрязнения атмосферного воздуха пахучими веществами можно разделить на три основные категории: участие сообщества, сенсорные методы и лабораторный химический анализ. При этом в настоящее время ни один подход не может полностью решить задачу измерения и оценки запаха в атмосфере. При использовании сенсорных методов (профилирование запахов, полевые исследования, полевая ольфактометрия), отражающих реальное воздействие на человека, зачастую можно получить противоречивые результаты вследствие существенной зависимости от индивидуального восприятия исследователем. Методы химического анализа (газовая хроматография, масс-спектрометрия), обладающие вследствие объективности большей определённости, не отражают восприятия запаха человеком, поэтому не всегда возможно связать идентифицированный химический состав с запахом, как и учесть вклад отдельных приоритетных одорантов. Сегодня назрела очевидная потребность в разработке стандарта мониторинга запахов в атмосферном воздухе, сочетающего все доступные методы.

Заключение. Дальнейшее совершенствование инструментов измерения и разработка стандартного подхода, сочетающего участие сообщества, сенсорные и аналитические методы, в итоге должно привести к научно обоснованным количественным критериям оценки запаха, установлению регламентов его содержания и контроля в атмосферном воздухе для минимизации вредного воздействия в районе размещения предприятий-источников.

Ключевые слова: запах; атмосферный воздух; пахучие вещества; сенсорные методы; аналитическая химия; профилирование запаха; ольфактометрия

Для цитирования: Бударина О.В., Скворонская С.А., Гошин М.Е., Сабирова З.Ф. Использование сенсорных и аналитических методов в гигиенической оценке запаха в атмосферном воздухе (обзор литературы). *Гигиена и санитария*. 2025; 104(5): 554–561. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2025-104-5-554-561> <https://elibrary.ru/ogmxfid>

Для корреспонденции: Бударина Ольга Викторовна, e-mail: budarina.ov@fncg.ru

Участие авторов: Бударина О.В. — концепция и дизайн исследования, написание текста, редактирование; Скворонская С.А. — сбор и обработка материала, редактирование; Гошин М.Е. — сбор и обработка материала, редактирование; Сабирова З.Ф. — редактирование. Все соавторы — утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках государственного задания № 1023032300263–5–3.3.5.

Поступила: 07.02.2025 / Поступила после доработки: 25.02.2025 / Принята к печати: 26.03.2025 / Опубликовано: 27.06.2025

Olga V. Budarina¹, Svetlana A. Skovronskaya¹, Mikhail E. Goshin¹, Zulfira F. Sabirova²

Use of sensory and analytical methods in hygienic assessment of odour in atmospheric air (literature review)

¹Federal Scientific Center of Hygiene named after F.F. Erisman, Mytishi, 141014, Russian Federation;²Centre for Strategic Planning of the Federal medical and biological agency, Moscow 119121, Russian Federation

ABSTRACT

Odours that affect humans are still not regulated by generally accepted standards, which makes their quantitative measurement difficult due to the peculiarities of perception. This highlights the need for research aimed at developing universal criteria for assessing odours present in the atmospheric air.

The purpose of the work is to generalize and analyze the approaches available in world practice used to assess odours in the environment. The search of literature sources was carried out using the databases Scopus, Web of Science, PubMed, Researchgate, RSCI, elibrary and Google scholar for 1999–2024.

According to the analysis, various approaches to the assessment of ambient air pollution by odorous substances can be divided into three main categories: community engagement, sensory methods, and laboratory chemical analysis. At the same time, no single approach can currently fully solve the problem of measuring and assessing odour in the atmosphere. Sensory methods (odour profiling, field studies, field olfactometry) which reflect real human exposure can lead to inconsistent results due to the significant dependence on the individual perception of the researcher. Chemical analysis methods (such as gas chromatography and mass spectrometry), have greater certainty due to their objectivity, but do not reflect human perception and it is not always possible to associate the identified chemical composition with odour, as well as to take into account the contribution of individual priority odourants. Today, there is a clear need to develop a standard for monitoring odours in atmospheric air, combining all available methods.

Conclusion. Further refinement of measurement tools and the development of a standard approach combining community participation, sensory, and analytical methods should eventually lead to scientifically based quantitative criteria for odour assessment, including established regulations for its content and control in ambient air to minimize harmful impacts in the area of source enterprises.

Keywords: odour; atmospheric air; odorous substances; sensory methods; analytical chemistry; odour profiling; olfactometry

For citation: Budarina O.V., Skovronskaya S.A., Goshin M.E., Sabirova Z.F. Use of sensory and analytical methods in hygienic assessment of odour in atmospheric air (literature review). *Gigiena i Sanitariya / Hygiene and Sanitation, Russian journal*. 2025; 104(5): 554–561. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2025-104-5-554-561> <https://elibrary.ru/ogmxfid> (In Russ.)

For correspondence: Olga V. Budarina, e-mail: budarina.ov@fncg.ru

Contribution: Budarina O.V. — concept and design of the study, writing the text, editing the article; Skovronskaya S.A. — collection and processing of the material, editing the article; Goshin M.E. — collection and processing of the material, editing the article; Sabirova Z.F. — editing the article. All authors are responsible for the integrity of all parts of the manuscript and approval of the manuscript final version

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Funding. The study was carried out within the framework of the state task No. 1023032300263–5–3.3.5.

Received: February 7, 2025 / Revised: February 25, 2025 / Accepted: April 8, 2025 / Published: June 27, 2025

Введение

Наличие раздражающего, навязчивого запаха в атмосферном воздухе в настоящее время является одной из основных жалоб населения в контролирующие органы во всём мире. Увеличение количества жалоб на неприятный запах может быть обусловлено расширением городских жилых районов на территории, которые ранее были преимущественно промышленными или сельскохозяйственными; увеличением мощности производства на объектах — источниках выбросов; более высокими эстетическими и экологическими ожиданиями граждан, а также их опасениями по поводу потенциальных рисков для здоровья, связанных с наличием в воздухе пахучих веществ [1].

Чётких единых параметров, позволяющих характеризовать воздействие запаха, не существует [2], что связано в первую очередь с особенностями ответной реакции организма человека на это воздействие. Чувствительность обонятельного анализатора может различаться у разных людей на несколько порядков, а воспринимаемая «неприятность», «навязчивость» запаха может варьироваться у индивидуумов как результат их физиологических и психосоциальных различий. Ольфакторная чувствительность человека подвержена влиянию различных факторов, в числе которых состав микробиоты носовой полости, общее состояние здоровья, психоэмоциональный статус и многое другое [3, 4].

В то же время химический анализ, дающий объективные результаты, не способен учесть особенностей восприятия запаха смесей пахучих веществ по причине их сложного состава и неизвестного характера комбинированного действия отдельных компонентов. Кроме этого, чувствительность аналитических методов зачастую существенно уступает обонянию человека, способному зафиксировать присутствие в воздухе химических соединений даже в малых концентрациях [5].

Согласно Jinks A. и Laing D.G. [6], вследствие эволюционного развития обоняние человека позволяет различать лишь несколько значимых стимулов: запахи, которые вызывают интенсивные, знакомые или неприятные ощущения, будут обнаружены с большей вероятностью, в то время как остальные теряются в «сигнальном шуме». Таким образом, оценка запаха страдает от высокой степени неопределённости и изменчивости вследствие субъективного характера его восприятия, что подчеркивает необходимость проведения дополнительных исследований, направленных на разработку универсальных критериев этой оценки с использованием комплексного подхода [7, 8].

Цель работы — обобщение методических подходов, используемых в мировой практике для измерения и мониторинга запахов в атмосферном воздухе, анализ передового опыта для выработки универсального подхода к определению запахов, который невозможно реализовать в рамках существующей нормативной базы. Поиск источников информации выполнен в международных базах данных Scopus, Web of Science, PubMed, Researchgate, РИНЦ, eLIBRARY и Google Scholar. Глубина поиска охватывала период с 1999 по 2024 г. Проанализировано более 200 источников научной информации, в основном зарубежных, из которых в обзор вошли 59 публикаций. Большинство работ, включённых в обзор, относятся к 2015–2024 гг.

Подходы к оценке загрязнения атмосферного воздуха пахучими веществами разнообразны, однако их можно разделить на три основные категории: участие сообщества, сенсорные методы и лабораторный химический анализ.

Участие сообщества (Community Engagement)

Несмотря на субъективность, участие местного населения в исследованиях запахов оказывается полезным инструментом их качественной оценки [1, 5, 9–11]. Методы вовлечения сообщества в исследование запаха предполагают анализ существующих баз данных жалоб, ведение дневников запаха, проведение опросов, интервью, работу с фокус-группами.

Оценка воздействия запаха с помощью так называемой «гражданской науки» (citizen science) основана на наблюдениях большого числа респондентов, что должно исключить личную предвзятость [12–16]. В Германии разработаны и используются на практике стандарты опроса населения [17]. Вовлечение сообщества является не только богатым источником информации, но и может иметь положительный психологический эффект, поскольку способствует более глубокому и комплексному пониманию влияния запахов на повседневную жизнь людей и помогает развитию гражданской ответственности и участию жителей в решении актуальных экологических проблем [18–21].

Сенсорные методы

Как было указано выше, на практике запах в основном обусловлен сложной смесью веществ, которые могут обладать синергетическим и (или) антагонистическим действием, влияя на общее восприятие [22]. Сенсорные методы основаны на использовании в качестве детектора обоняния человека. С помощью этих методов определяются следующие параметры: различные ноты запаха (с подбором соответствующих характеристик), приятность либо неприятность запаха (гедонический тон) и его интенсивность, которые обычно измеряются в баллах или определяются в соответствии со шкалами [1, 11].

Профилирование запахов. В последние десятилетия стали применять прямой способ оценки запаха на основе суждения о его свойствах «как есть» (as is) [23–25]. Этот методический подход называется «профилированием запаха» (odor profiling) и может использоваться как на месте, где наблюдается запах (in situ), так и в лаборатории при транспортировке туда отобранного образца.

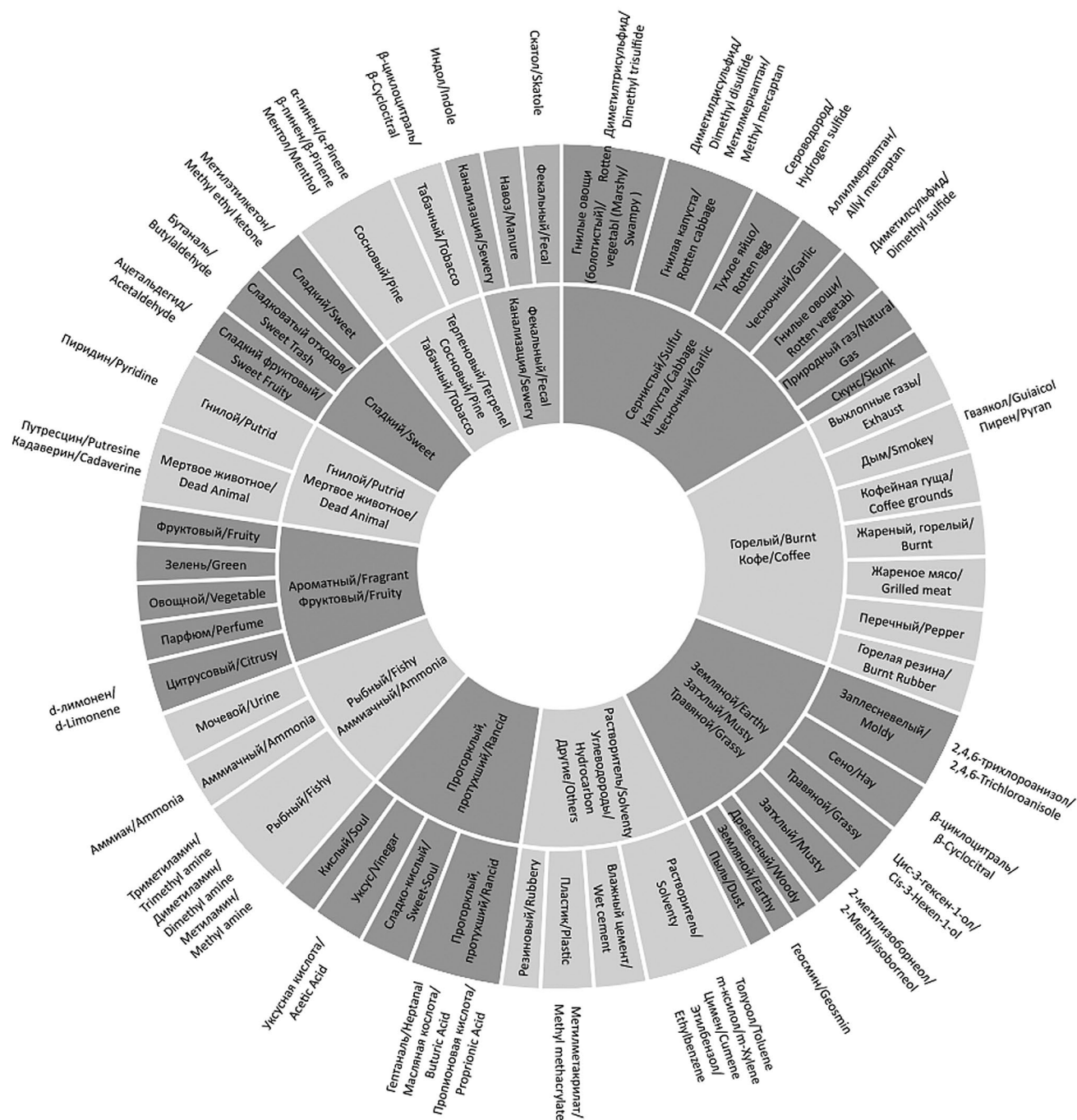
Согласно G.A. Burlingame [24, 25], метод профилирования запаха (Odor Profile Method, OPM) предполагает определение одной или нескольких нот запаха в образце и определение интенсивности запаха для каждой ноты. Для описания нот запаха разработан стандартизированный словарь [26], который может быть отображён графически в виде «колеса запаха» (odour wheel).

На рисунке представлен пример «колеса запаха», составленного по результатам исследований воздушной среды в месте размещения свалки [10]. Как видно на рисунке, «колесо запаха» состоит из трёх колец: внутреннего (общие ноты запаха), среднего (более специфические ноты запаха в каждом сегменте) и внешнего (потенциальные одоранты, связанные с каждой нотой запаха).

Метод «профилирования запаха» требует привлечения как минимум четырёх отобранных по чувствительности и обученных участников. Исследования с его помощью являются скрининговыми, при этом весьма полезными для исследования характера запаха, идентификации его источника, выявления веществ, ответственных за раздражающий запах [5, 10, 27, 28].

Определение пороговых значений с помощью разведений. Данный способ исследования основан на разбавлении отобранного образца смеси пахучих веществ до концентрации ниже порога обнаружения запаха [1, 28]. Количество разведений, необходимое для достижения этой точки, считается показателем интенсивности запаха исходного (неразбавленного) образца.

Полевые пороговые испытания с помощью разведений (полевая ольфактометрия). В полевых условиях используют портативные приборы для разведения атмосферного воздуха. В США к таким инструментам относятся Nasal Ranger® (St. Croix Sensory, 2008) и Scentroid SM100 (Scentroid, 2019). В обоих случаях отбираемый воздух смешивается с чистым воздухом в переменных соотношениях. Соотношение, при котором запах исчезает, определяется как показатель «разбавление до порогового значения» (dilution-to-threshold, D/T) [29]. Полевые разбавляющие устройства не требуют предварительного сбора, хранения и транспортировки проб.



Пример «колеса запаха» свалки [10].

Example of the Landfill Odour Wheel [10].

Полевые измерения запаха отобранными группами испытателей (полевые панели). В Европе полевые исследования, занимающие центральное место при оценке загрязнения атмосферы пахучими веществами, включают методы «сетки» и «шлейфа» (grid and plume methods) [30, 31]. Оба метода подразумевают, что отобранные и обученные исследователи оценивают наличие, а в ряде случаев — характер, интенсивность и гедонический тон запаха. Для получения репрезентативной карты воздействия запахов на население метод «сетки» применяется в течение длительного времени (например, полгода или одного года). Метод «шлейфа» используют для определения области распространения запаха при определённых метеорологических условиях. Добавление к вышеуказанным исследованиям «профиля запаха» может помочь идентифицировать предполагаемые одоранты.

Лабораторный химический анализ

Для подтверждения результатов сенсорного анализа воздействия запахов окружающей среды используют традиционные методы аналитической химии. Химический анализ наиболее целесообразен в тех случаях, когда в отличие от разнообразных смесей запахов обусловлен известными одорантами. Список пахучих соединений, которые можно измерить, практически бесконечен. Например, более 400 веществ было обнаружено в воздухе вблизи свиноводческих ферм [32]. Хотя идентификация и количественное определение конкретных одорантов напрямую не всегда отражает потенциального раздражения запахом, эта информация полезна для выявления источников запаха [5].

Методы оценки запаха в атмосферном воздухе [28]**Odour assessment methods in ambient air [28]**

Метод / Method		Преимущества / Advantages	Недостатки / Disadvantages
Участие сообщества Community Engagement	Дневники запаха Odor diaries	Выявляет неизвестные случаи Identifies unknown cases Сильная корреляция с аналитическими результатами Низкая стоимость Strong correlation with analytical results Low cost	Отрывочная информация Sketchy information Необходимо сочетать с аналитическими измерениями Need to be combined with analytical measurements
	Опрос Surveys	Учитывает психосоциальные аспекты Takes into account psychosocial aspects	Необходимость тщательной проработки дизайна исследования Необходимость сочетания с аналитическими измерениями Длительны по времени, трудозатратны The need for careful study design The need to combine with analytical measurements Time-consuming, labor-intensive
Сенсорные методы Sensory Methods	Профилерование запаха Odour profiling	Учитывает характеристики запахов Takes into account odour characteristics	Длительны по времени, трудозатратны Частые отклонения от протоколов Большие расхождения результатов между участниками исследований Time-consuming, labour-intensive Often deviations from protocols Large discrepancies between participants of investigations
	Определение пороговых значений с помощью разведений в лаборатории Detection of threshold values with dilutions in the Laboratory	Количественная оценка запахов Quantification of odours Статистически сильный Statistically strong	Исключаются высокочувствительные участники Excludes highly sensitive panelists Частые отклонения от протоколов Усталость участников Often deviations from protocols Panelist fatigue
	Полевые пороговые испытания (полевая ольфактометрия) Field threshold trials (field olfactometry)	Количественная оценка запахов Практичный, доступный Quantification of odours Pragmatic, affordable Позволяет избежать проблем с отбором проб Allows avoiding sampling challenge	Кратковременная оценка Momentary assessment Требуется тщательная тренировка Careful training is required
	Полевые исследования с помощью испытателей (панели) Field investigations with testing operators (panels)	Непосредственно получаемая сенсорная информация Directly obtained sensory information Позволяет избежать проблем с отбором проб Allows avoiding sampling challenge	Длительные исследования Time consuming research Требуется тщательная тренировка Extensive training required
Аналитические методы Analytical Methods	Газовая хроматография и масс-спектрометрия Gas chromatography and mass spectrometry	Точный метод для отдельных одорантов Precise method for specific odourants Выявление перекрывающихся источников Identification of overlapping sources	Подходит только для определённых одорантов Is suitable for certain odourants only Не отражает чувствительности человека Сложный сбор образцов Дорогой, трудоёмкий Fails to reflect human sensitivity Tricky sample collection Expensive, time-consuming
	Газовая хроматография с сенсорным портом GC-Sensory port	Может указывать на ключевые одоранты Can indicate to key odourants Соответствует человеческому обонянию matches Human olfactory	Не учитывает синергизм, антагонизм Misses synergism, antagonism Сложный сбор образцов Дорогой, трудоёмкий Tricky sample collection Expensive, time-consuming
	«Электронный нос» E-nose	Непрерывность работы Operational continuity Приближённость к человеческому обонянию Proximity to the human olfactory	Недостаточная чувствительность Not sensitivity enough Подходит только для определённых одорантов Is suitable for certain odourants only

Газовая хроматография и масс-спектрометрия. Газовая хроматография, которая разделяет и количественно определяет одоранты, полезна для сложных смесей химических веществ с неизвестным составом. Однако высокочувствительный метод газовой хроматографии с использованием масс-селективного детектора (чувствительность достигает уровня ppb^1 , а иногда и уровня ppt^2) не позволяет идентифицировать все вещества, обуславливающие специфический запах, например, соединения серы, которые нестабильны во время сбора и транспортировки проб, а также неорганические соединения, которые определяются ионохроматографическим, флуориметрическим и другими методами. При этом расшифровка состава пахучих веществ не даёт информации о том, какой вклад вносят эти вещества в общий запах смеси [33–36], что можно также признать недостатком данного метода.

Гибридные аналитические и сенсорные методы. Газовая хроматография с сенсорным портом (GC-sensory), часто выполняемая в тандеме с масс-спектрометрией (GC-MS-sensory), представляет собой гибридную методику, объединяющую определение пахучих веществ и чувствительность человеческого обоняния. Сенсорный порт позволяет аналитику чувствовать запах соединений в то время, когда приборный детектор считывает показания. В случае успеха определяются одоранты, вносящие основной вклад в общий запах. К последним достижениям в этой области относятся улучшенные интерфейсы GC-портов, увеличение числа участников исследования (до 8), методы двумерной GC и сложная обработка данных [37]. Вместе с тем GC-сенсорный метод имеет ограничения, в том числе особенности индивидуального восприятия, длительность анализа, возможность перекрытия пиков двух или более одорантов. В пищевой промышленности GC-сенсорика идентифицирует приблизительно 50% одорантов [38]. Невозможность прогнозирования синергетических или антагонистических взаимодействий пахучих веществ также ограничивает возможности GC-сенсорного анализа [39].

Датчики, специфичные для газа. Датчики, специфичные для газа, нацелены на определение ключевых одорантов, но не общего запаха. Они часто портативны, относительно недороги, оснащены функцией непрерывной регистрации данных. Наиболее распространёнными газоспецифическими датчиками являются определители сероводорода и аммиака. Детектирование осуществляется с помощью химических, электрохимических, каталитических или оптических сигналов. Чувствительность некоторых датчиков достигает уровня ppb . Однако определение даже ключевых одорантов в основном не отражает всего спектра неприятных запахов [40]. Разработаны усовершенствованные датчики с использованием металлооксидных детекторов, преимуществом которых является работа при различных уровнях влажности [41].

Неспецифические матрицы газовых датчиков (электронные носы). Сочетание усовершенствованных сенсорных технологий и передовых вычислительных методов привело к созданию неспецифических газовых сенсорных матриц, имитирующих человеческое обоняние. Так называемый «электронный нос» (e-nose) представляет собой набор датчиков (сенсоров) общим количеством до 30, генерирующих сложный электронный сигнал, который обрабатывается с помощью компьютерных алгоритмов. Результат считывания известного запаха («отпечаток запаха») в виде диаграмм, полярных диаграмм и др. сравнивается с сигналами от исследуемых образцов на предмет совпадения [42]. При правильной калибровке «электронные носы» должны непрерывно обнаруживать присутствие запахов в окружающем воздухе, оценивать их концентрацию и связывать обнаруживаемый запах с конкретным источником [43].

Датчики обычно представляют собой различные оксиды металлов, проводящие полимеры и колеблющиеся кристал-

лы кварца, при этом в стадии разработки постоянно находятся новые материалы. Заметим, что датчики подвержены деградации, воздействию температуры, влажности, что требует их частой повторной калибровки.

Не всегда возможно обнаружить «электронные носы», используемые за пределами исследовательских лабораторий [42]. Эти устройства хорошо функционируют в контексте, для которого разработаны (безопасность на рабочем месте, качество воздуха в помещении и т. д.), но ещё не способны охватить всю полноту спектра запахов, присутствующих в окружающей среде [44, 45]. К усовершенствованию «электронных носов» и расширению их использования может привести в том числе расшифровка молекулярных механизмов, которые запускают наше обоняние [46].

Другие технологии категории e-nose представляют собой портативные газовые хроматографы или масс-спектрометры [42, 47], в которых «электронная слизистая», состоящая из нескольких сенсорных матриц, действует как неподвижная фаза колонки газовой хроматографии для дифференциального распределения пахучих веществ.

В приведённой таблице систематизированы рассмотренные выше подходы к оценке запахов в окружающей среде, указаны их преимущества и недостатки [28].

В настоящее время ни один из подходов не способен полностью и эффективно решить задачу измерения и оценки запаха в атмосферном воздухе [28]. Методы химического анализа, несомненно, обладают большей определённостью, однако они не отражают восприятия человека, и не всегда возможно связать идентифицированный химический состав с запахом. Химический анализ может также не учитывать вклада отдельных одорантов, которые обладают сильным запахом, но присутствуют в низких концентрациях, что обуславливает наличие достоверных данных о порогах обнаружения приоритетных одорантов. Преимущество сенсорных методов состоит в том, что они отражают реальное воздействие на население, однако вследствие разного восприятия запахов могут показывать противоречивые результаты.

Вывод многих исследователей заключается в том, что вместо одного необходимо использовать правильное сочетание нескольких методов [5, 12], например, определение профиля запаха с последующим подтверждением сенсорным методом GC-MS [10].

Для экономии ресурсов перед углублённой оценкой воздействия запаха в ряде работ предлагается применить оценку на уровне скрининга [28]. В частности, при сложных или трудноразрешимых ситуациях предварительная органолептическая оценка может состоять из анализа жалоб или определения профиля запаха, что позволит выявить основные характеристики и источники запаха в атмосфере, а также предполагаемые пахучие вещества, его формирующие [10].

Если оценка на уровне скрининга не позволяет устранить проблему неприятного запаха, особенно в случаях перекрывающихся запахов, неизвестных источников или отказа представителей потенциального источника признать ответственность, необходимы углублённые исследования. При уточнённой оценке используют полевые исследования с помощью отобранных испытателей методом «шлейфа» [31] на начальном этапе с дальнейшим «сетчатым» подходом в случае постоянных запахов [30]. Если имеется достаточная информация об отдельных одорантах, обуславливающих запах окружающей среды, проводят отбор проб воздуха для аналитического исследования, в частности с помощью GC-MS-методов. Полезным инструментом для идентификации приоритетных одорантов и установления их связи с источником является метод профилирования запаха в сочетании с аналитическим определением [28].

В настоящее время не существует международного стандарта оценки раздражающего, навязчивого запаха окружающей среды, в том числе методов отбора проб и анализа запахов. По свидетельству многих исследователей, *назрела очевидная потребность в разработке стандарта мониторинга запахов в атмосферном воздухе, сочетающего как сенсорные,*

¹ Ppb — одна миллиардная часть величины (parts per billion).

² Ppt — одна триллионная часть величины (parts per trillion).

так и аналитические методы, что соответствует рекомендациям ВОЗ [48]. Для использования различных социологических инструментов необходимо разработать критерии оценки уровня «раздражения» населения [15, 49]. Повысить прогностические возможности аналитических измерений помогут фундаментальные исследования запахов. Более широкое использование сенсорных методов в газовой хроматографии позволит, вероятно, преодолеть разрыв между сенсорным и аналитическим обнаружением, который существует сегодня [28].

Из-за сложных физиологических и психологических факторов, связанных с обонянием человека, прогнозирование воздействия запаха с использованием «электронных носов» будет возможно лишь в будущем, однако более близкая аппроксимация обоняния с помощью сложных сенсорных матриц может снизить зависимость от участия человека в исследованиях и обеспечить непрерывный мониторинг в будущем. Машинное обучение уже используется для расшифровки обонятельных реакций человека путём обнаружения и распознавания запахов на основе шаблонов, обонятельных фенотипов, биомаркёров болезней, физико-химических свойств и анализа общедоступных баз данных [50].

До недавнего времени в нашей стране контроль загрязнения атмосферного воздуха пахучими веществами осуществлялся исключительно аналитическими методами по кратности превышения максимальных разовых ПДК отдельных веществ, что не позволяло провести адекватную оценку качества воздуха и определить обоснованность жалоб населения на запах [51]. Однако имеется и положительный опыт оценки загрязнения атмосферного воздуха по ольфактометрическому критерию (доле превышений порога запаха) для целей социально-гигиенического мониторинга [52], ольфактоодориметрическому критерию (вероятности ощущения запаха разной силы) при обосновании размеров санитарно-защитных зон [51], а также использования комплексного подхода с временным анализом жалоб [53], применения статистики жалоб населения и современных методов теории нечётких множеств [54] при идентификации источников выбросов пахучих веществ. По результатам анализа сообщений жителей в социальных сетях, проведённых интервью и изучению фокус-групп выявлены предполагаемые источники раздражающего запаха в городе с различными источниками выбросов пахучих веществ [55]. Для характеристики запаха в реальных условиях был применён комплексный подход с использованием расчётных, опросных, сенсорных и аналитических методов в районе размещения предприятий пищевой и перерабатывающей промышленности [56].

Таким образом, используемые в настоящее время центрами гигиены и эпидемиологии методы химического анализа (газоспецифические датчики, газовая хроматография и масс-спектрометрия) с учётом передовой практики в области оценки загрязнения атмосферного воздуха пахучими веществами должны быть дополнены методами сенсорного анализа в сочетании с участием сообщества. Для реализации этого направления необходимо разработать алгоритм комплексной оценки запаха в районах размещения предприятий и иных объектов — источников выбросов пахучих веществ с обоснованием как физико-химических, так и органолептических критериев его воздействия, что является задачей ближайшего будущего.

Заключение

Проведённый анализ научных публикаций свидетельствует о том, что страны и сообщества всё чаще используют в своей практике мониторинг окружающих запахов, и эта тенденция, несомненно, сохранится. Наблюдается общий тренд применения сенсорных методов измерения запахов наряду с инструментальным анализом отдельных химических веществ, и во всём мире продолжается работа по стандартизации этих измерений. Вероятно, станет шире применение подходов, основанных на «гражданской науке», а технический прогресс будет способствовать более эффективному сбору и анализу исходных данных. Также есть многообещающие достижения, связанные со стандартизацией «электронных носов» и разработкой более эффективных инструментов измерения. Многочисленные рабочие группы в настоящее время обсуждают методы тестирования и валидации сенсорных технологий.

Получение максимально широкого представления о загрязнении атмосферного воздуха пахучими веществами требует комплексного подхода. Дальнейшее совершенствование инструментов измерения и разработка стандартного подхода, сочетающего участие сообщества, сенсорные и аналитические методы, позволит получить научно обоснованные количественные критерии оценки запаха с установлением регламентов его содержания и контроля в атмосферном воздухе для минимизации вредного воздействия в районе размещения предприятий-источников. Постоянный анализ различных используемых методов позволит создавать новые нормативные акты и актуализировать существующие.

Литература

(п.п. 1–50 см. References)

- Бударина О.В. Научное обоснование современных гигиенических основ нормирования, контроля и оценки запаха в атмосферном воздухе населённых мест: Автореф. дисс. ... д-ра мед. наук. М.; 2020. <https://elibrary.ru/gfxhxy>
- Киселев А.В., Григорьева Я.В. Применение результатов расчета загрязнения атмосферного воздуха для социально-гигиенического мониторинга. *Гигиена и санитария*. 2017; 96(4): 306–9. <https://elibrary.ru/ykuqhr>
- Карелин А.О., Ломтев А.Ю., Фридман К.Б., Еремин Г.Б., Панькин А.В. Выявление источников выбросов загрязняющих веществ, вызывающих жалобы населения на неприятные запахи. *Гигиена и санитария*. 2019; 98(6): 601–7. <https://elibrary.ru/cebqhl>
- Зайцева Н.В., Май И.В., Кириянов Д.А., Клейн С.В., Чигвинцев В.М., Клячин А.А. Методические подходы к пространственной идентификации вероятных источников неприятного запаха в атмосферном воздухе на основе методов нечеткой логики. *Анализ риска здоровью*. 2024; (4): 14–26. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2024.4.02> <https://elibrary.ru/jtjhme>
- Маковецкая А.К., Хрипач Л.В., Гошин М.Е., Бударина О.В., Карманов А.В. Роль социологических методов исследований в осуществлении эколого-гигиенического мониторинга территорий. *Гигиена и санитария*. 2023; 102(9): 902–8. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-9-902-908> <https://elibrary.ru/qplnzh>
- Бударина О.В., Сабирова З.Ф., Сковронская С.А., Додина Н.С., Кохан А.А., Малышева А.Г. Комплексная гигиеническая оценка загрязнения атмосферного воздуха в районе размещения предприятий пищевой и перерабатывающей промышленности. *Гигиена и санитария*. 2024; 103(3): 198–207. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2024-103-3-198-207> <https://elibrary.ru/dkrspp>

References

- Bokowa A., Diaz C., Koziel J.A., McGinley M., Barclay J., Schauburger G., et al. Summary and overview of the odor regulations worldwide. *Atmosphere*. 2021; 12(2): 206. <https://doi.org/10.3390/atmos12020206>
- Henshaw P., Nicell J., Sikdar A. Parameters for the assessment of odour impacts on communities. *Atmospheric Environment*. 2006; 40(6): 1016–29. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.11.014>
- Koskinen K., Reichert J.L., Hoier S., Schachenreiter J., Duller S., Moissl-Eichinger C., et al. The nasal microbiome mirrors and potentially shapes olfactory function. *Sci. Rep.* 2018; 8(1): 1296. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-19438-3>
- Rawls M., Ellis A.K. The microbiome of the nose. *Ann. Allergy Asthma Immunol.* 2019; 122(1): 17–24. <https://doi.org/10.1016/j.anaai.2018.05.009>

5. Muñoz R., Sivret E.C., Parcsi G., Lebrero R., Wang X., Suffet I.H., et al. Monitoring techniques for odour abatement assessment. *Water Res.* 2010; 44(18): 5129–49. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.06.013>
6. Jinks A., Laing D.G. The analysis of odor mixtures by humans: evidence for a configurational process. *Physiol. Behav.* 2001; 72(1–2): 51–63. [https://doi.org/10.1016/s0031-9384\(00\)00407-8](https://doi.org/10.1016/s0031-9384(00)00407-8)
7. Good practices guide for odour management in Alberta: From prevention and mitigation to assessment and complaints. Clean Air Strategic Alliance (CASA); 2015. Available at: https://casahome.org/uploads/source/PDF/CASA_GPG_webversion_V3.pdf
8. Odour guideline for prescribed premises. Draft. Perth: Department of Water and Environmental Regulation, Government of Western Australia; 2018. Available at: https://der.wa.gov.au/images/documents/our-work/consultation/OdourGuideline/17-01-2018_Odour_GdL_external_consult.pdf
9. Gallego E., Soriano C., Roca F.X., Perales J.F., Alarcón M., Guardino X. Identification of the origin of odour episodes through social participation, chemical control and numerical modelling. *Atmospheric Environment.* 2008; 42(35): 8150–60. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.08.004>
10. Curren J., Hallis S.A., Snyder C.C.L., Suffet I.M.H. Identification and quantification of nuisance odors at a trash transfer station. *Waste Manag.* 2016; 58: 52–61. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.09.021>
11. Brancher M., Griffiths K.D., Franco D., de Melo Lisboa H. A review of odour impact criteria in selected countries around the world. *Chemosphere.* 2017; 168: 1531–70. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.11.160>
12. Hayes J.E., Stevenson R.J., Stuetz R.M. The impact of malodour on communities: a review of assessment techniques. *Sci. Total. Environ.* 2014; 500–1: 395–407. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.09.003>
13. Eykelbosh A., Maher R., Monticelli D.F., Ramkairsingh A., Henderson S., Giang A., et al. Elucidating the community health impacts of odours using citizen science and mobile monitoring. *Environ. Health Rev.* 2021; 64(2): 24–7. <https://doi.org/10.5864/d2021-010>
14. Yang W., Li W., Zhang Y., Han M., Zhai Z., Cui H. Exposure-response relationship and chemical characteristics of atmospheric odor pollution from a cigarette factory. *Aerosol Air Qual. Res.* 2021; 22(6): 210314. <https://doi.org/10.4209/aaqr.210314>
15. Brancher M., De Melo Lisboa H. Odour impact assessment by community survey. *Chem. Eng. Trans.* 2014; 40: 139–44. <https://doi.org/10.3303/CET1440024>
16. Zarra T., Belgiorio V., Naddeo V. Environmental odour nuisance assessment in urbanized area: analysis and comparison of different and integrated approaches. *Atmosphere.* 2021; 12(6): 690. <https://doi.org/10.3390/atmos12060690>
17. Effects and assessment of odours. Assessment of odour annoyance. Questionnaires. VDI 3883 – Part 1; 2015.
18. Sazakli E., Leotsinidis M. Odor nuisance and health risk assessment of VOC emissions from a rendering plant. *Air Qual. Atmos. Health.* 2021; 14(3): 301–12.
19. Hirasawa Y., Shirasu M., Okamoto M., Touhara K. Subjective unpleasantness of malodors induces a stress response. *Psychoneuroendocrinology.* 2019; 106: 206–15. <https://doi.org/10.1016/j.psyneuen.2019.03.018>
20. Hoenen M., Wolf O.T., Pause B.M. The impact of stress on odor perception. *Perception.* 2017; 46(3–4): 366–76. <https://doi.org/10.1177/0301006616688707>
21. Sironi S., Capelli L., Céntola P., Del Rosso R., Pierucci S. Odour impact assessment by means of dynamic olfactometry, dispersion modelling and social participation. *Atmos. Environ.* 2010; 44(3): 354–60. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSENV.2009.10.029>
22. Gostelow P., Longhurst P., Parsons S.A., Stuetz R.M. Sampling for measurement of odours. IWA Publishing, Scientific and Technical Report. London; 2003. <https://doi.org/10.2166/9781780402819>
23. Jiang J., Coffey P., Toohey B. Improvement of odor intensity measurement using dynamic olfactometry. *J. Air Waste Manag. Assoc.* 2006; 56(5): 675–83. <https://doi.org/10.1080/10473289.2006.10464474>
24. Burlingame G.A. Odor profiling of environmental odors. *Water Sci. Technol.* 1999; 40(6): 31–8. [https://doi.org/10.1016/s0273-1223\(99\)00534-x](https://doi.org/10.1016/s0273-1223(99)00534-x)
25. Burlingame G.A. A practical framework using odor survey data to prioritize nuisance odors. *Water Sci. Technol.* 2009; 59(3): 595–602. <https://doi.org/10.2166/wst.2009.872>
26. Poupon D., Fernandez P., Archambault Boisvert S., Migneault-Bouchard C., Frasnelli J. Can the identification of odorants within a mixture be trained? *Chem. Senses.* 2018; 43(9): 721–6. <https://doi.org/10.1093/chemse/bjy060>
27. Suffet I.M., Braithwaite S., Zhou Y., Bruchet A. Chapter 2: The drinking water taste-and-odor wheel after 30 years. In: *Taste and Odour in Source and Drinking Water: Causes, Controls, and Consequences.* IWA Publishing; 2019. https://doi.org/10.2166/9781780406664_0011
28. Braithwaite S. *Sensory analysis and health risk assessment of environmental odors*: Ph.D. thesis. Los Angeles; 2019. Available at: <https://escholarship.org/uc/item/21g660d3>
29. Walgraef C., Van Huffel K., Bruneel J., Van Langenhove H. Evaluation of the performance of field olfactometers by selected ion flow tube mass spectrometry. *Biosyst. Eng.* 2015; 137: 84–94.
30. European Committee for Standardization CEN. Ambient Air – Determination of Odour in Ambient Air by Using Field Inspection – Part 1: Grid Method. Brussels; 2016.
31. European Committee for Standardization CEN. Ambient Air – Determination of Odour in Ambient Air by Using Field Inspection – Part 2: Plume Method. Brussels; 2016.
32. Schiffman S.S., Bennett J.L., Raymer J.H. Quantification of odors and odorants from swine operations in North Carolina. *Agric. For. Meteorol.* 2001; 108(3): 213–40. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(01\)00239-8](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(01)00239-8)
33. Van Huffel K., Heynderickx P.M., Dewulf J., Van Langenhove H. Measurement of odorants in livestock buildings: SIFT-MS and TD-GC-MS. *Chem. Eng.* 2012; 30: 67–72. <https://doi.org/10.3303/cet1230012>
34. Volckaert D., Heynderickx P.M., Van Langenhove H. Online SIFT-MS measurement of a biofilter response to dimethylsulfide concentration step changes; 2013. Available at: <https://biblio.ugent.be/publication/4091705/>
35. Langford V., McEwan M., Askey M., Barnes H., Olerenshaw J. Comprehensive instrumental odor analysis using SIFT-MS: A case study. *Environments.* 2018; 5(4): 43. <https://doi.org/10.3390/environments5040043>
36. Hera D., Langford V., McEwan M., McKellar T., Milligan D. Negative reagent ions for real time detection using SIFT-MS. *Environments.* 2017; 4(1): 16. <https://doi.org/10.3390/environments4010016>
37. Brattoli M., Cisternino E., Dambruoso P.R., de Gennaro G., Giungato P., Mazzone A., et al. Gas chromatography analysis with olfactometric detection (GC-O) as a useful methodology for chemical characterization of odorous compounds. *Sensors (Basel).* 2013; 13(12): 16759–800. <https://doi.org/10.3390/s131216759>
38. Molecular laboratory capabilities. Centre of Competence – Molecular Odour Evaluation (MOE). SenseNet; 2018. Available at: <https://sensenet.net/wp-content/uploads/2018/10/SENSENET-Workshop-Rennes-2018-PM.pdf>
39. Ryan D., Prenzler P.D., Saliba A.J., Scollary G.R. The significance of low impact odorants in global odour perception. *Trends Food Sci. Technol.* 2008; 19(7): 383–9. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2008.01.007>
40. Vitko T.G. How to boil down OCSD's odor control master plan into one page. *Proc. Water Environ. Fed.* 2018; 2018(2): 205–25.
41. Sauerwald T., Baur T., Leidinger M., Reimringer W., Spinelle L., Gerboles M., et al. Highly sensitive benzene detection with metal oxide semiconductor gas sensors – an inter-laboratory comparison. *J. Sensors Sensor Syst.* 2018; 7(1): 235–43. <https://doi.org/10.5194/jsss-7-235-2018>
42. Boeker P. On 'electronic nose' methodology. *Sensors Actuat. B Chem.* 2014; 204: 2–17. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2014.07.087>
43. Dentoni L., Capelli L., Sironi S., Del Rosso R., Zanetti S., Della Torre M. Development of an electronic nose for environmental odour monitoring. *Sensors (Basel).* 2012; 12(11): 14363–81. <https://doi.org/10.3390/s121114363>
44. Schütze A., Baur T., Leidinger M., Reimringer W., Jung R., Conrad T., et al. Highly sensitive and selective VOC sensor systems based on semiconductor gas sensors: How to? *Environments.* 2017; 4(1): 20. <https://doi.org/10.3390/environments4010020>
45. Guillot J.M. E-noses: Actual limitations and perspectives for environmental odour analysis. *Chem. Eng. Trans.* 2016; 54: 223–8.
46. Keller A., Gerkin R.C., Guan Y., Dhurandhar A., Turu G., Szalai B., et al. Predicting human olfactory perception from chemical features of odor molecules. *Science.* 2017; 355(6327): 820–6. <https://doi.org/10.1126/science.aal2014>
47. Deshmukh S., Bandyopadhyay R., Bhattacharyya N., Pandey R.A., Jana A. Application of electronic nose for industrial odors and gaseous emissions measurement and monitoring – an overview. *Talanta.* 2015; 144: 329–40. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2015.06.050>
48. WHO. Air quality guidelines for Europe, 2nd edition. Copenhagen; 2000.
49. Freeman T., Cudmore R. Review of odour management in New Zealand. Air Quality Technical Report No. 24. Wellington; 2002. Available at: <https://environment.govt.nz/assets/Publications/Files/odour-tr-aug02.pdf>
50. Lötsch J., Kringel D., Hummel T. Machine learning in human olfactory research. *Chem. Senses.* 2019; 44(1): 11–22. <https://doi.org/10.1093/chemse/bjy067>
51. Budarina O.V. *Scientific substantiation of modern hygienic bases of rationing, control and evaluation of odour in the atmospheric air of populated areas*: Diss. Moscow; 2020. <https://elibrary.ru/gfxxuy> (in Russian)
52. Kiselev A.V., Grigoreva Ya.V. Application of the results of calculation of atmospheric air pollution for social and hygienic monitoring. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal).* 2017; 96(4): 306–9. <https://elibrary.ru/ykuqhr> (in Russian)
53. Karelin A.O., Lomtev A.Yu., Friedman K.B., Yeregin G.B., Pankin A.V. Identification of emission sources of pollutants causing complaints of unpleasant odours. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal).* 2019; 98(6): 601–7. <https://elibrary.ru/cebqhl> (in Russian)
54. Zaitseva N.V., May I.V., Kiryanov D.A., Kleyn S.V., Chigvintsev V.M., Klyachin A.A. Methodical approaches to spatial identification of probable sources of obnoxious odors in ambient air based on fuzzy logic. *Analiz riska zdorov'yu.* 2024; (4): 1–26. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2024.4.02> <https://elibrary.ru/jtjhme> (in Russian)
55. Makovetskaya A.K., Khripach L.V., Goshin M.E., Budarina O.V., Karmanov A.V. The role of sociological methods in implementation of environmental hygienic health monitoring for territories. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal).* 2023; 102(9): 902–8. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-9-902-908> <https://elibrary.ru/qplnzf> (in Russian)
56. Budarina O.V., Sabirova Z.F., Skovronskaya S.A., Dodina N.S., Kokhan A.A., Malysheva A.G. Comprehensive hygienic assessment of ambient air pollution in the area of food and processing industry enterprises' location. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal).* 2024; 103(3): 198–207. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2024-103-3-198-207> <https://elibrary.ru/dkrspg> (in Russian)

Сведения об авторах

Бударина Ольга Викторовна, доктор мед. наук, гл. науч. сотр. отд. анализа риска здоровью населения ФБУН «ФНЦГ им. Ф.Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора, 141014, Мытищи, Россия. E-mail: budarina.ov@fncg.ru

Сковронская Светлана Александровна, канд. мед. наук, ст. науч. сотр. отд. анализа риска здоровью населения ФБУН «ФНЦГ им. Ф.Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора, 141014, Мытищи, Россия. E-mail: sko_sveta@mail.ru

Гошин Михаил Евгеньевич, канд. хим. наук, ст. науч. сотр. отд. анализа риска здоровью населения ФБУН «ФНЦГ им. Ф.Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора, 141014, Мытищи, Россия. E-mail: Goshin.ME@fncg.ru

Сабирова Зульфия Фаридовна, доктор мед. наук, вед. науч. сотр. отд. гигиены ФГБУ «ЦСП» ФМБА России, 119121, Москва, Россия. E-mail: ZSabirova@cspmrz.ru

Information about the authors

Olga V. Budarina, DSc (Medicine), chief researcher, Department of Public Health Risk Analysis, Federal Scientific Center of Hygiene named after F.F. Erisman, Mytisch, 141014, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-4319-7192> E-mail: budarina.ov@fncg.ru

Svetlana A. Skovronskaya, PhD (Medicine), senior researcher, Department of Public Health Risk Analysis, Federal Scientific Center of Hygiene named after F.F. Erisman, Mytisch, 141014, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-6374-9292> E-mail: sko_sveta@mail.ru

Mikhail E. Goshin, PhD (Chemistry), senior researcher, Department of Public Health Risk Analysis, Federal Scientific Center of Hygiene named after F.F. Erisman, Mytisch, 141014, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-7251-3938> E-mail: Goshin.ME@fncg.ru

Zulfiya F. Sabirova, DSc (Medicine), leading researcher, Department of Hygiene, Centre for Strategic Planning of the Federal medical and biological agency, Moscow, 119121, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-3505-8344> E-mail: ZSabirova@cspmrz.ru
