

Научная статья

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ВЕРОЯТНЫХ ИСТОЧНИКОВ НЕПРИЯТНОГО ЗАПАХА В АТМОСФЕРНОМ ВОЗДУХЕ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

Н.В. Зайцева, И.В. Май, Д.А. Кирьянов, С.В. Клейн, В.М. Чигвинцев, А.А. Клячин

Федеральный научный центр медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения, Российская Федерация, 614045, г. Пермь, ул. Монастырская, 82

Рассматривается задача поиска неизвестного источника запахового загрязнения, относящаяся к классу «существенно неопределенные задачи», для которой предложено формальное решение. Проблема неприятного запаха актуальна для многих сельских территорий крупных городов и промышленных центров. Несмотря на меры государственного контроля выбросов, в том числе от мест утилизации отходов, неустановленные источники загрязнений нередко вызывают многочисленные жалобы населения. Отмечается влияние запахового загрязнения на здоровье, в том числе на дыхательную, сердечно-сосудистую и нервную системы, снижение качества жизни и уровня адаптации. Основными источниками запахов чаще всего являются промышленные предприятия, очистные сооружения и объекты переработки отходов. При этом сложность контроля качества воздуха обусловлена субъективностью восприятия запахов и их многокомпонентностью.

Предложенный подход к поиску источников неприятного запаха базируется на применении статистики жалоб населения и современных методов теории нечетких множеств. Статистика жалоб, формируемая жителями, имеет субъективный и эмоциональный характер. В методе запахов представлен как лингвистическая переменная, учитывающая качество, интенсивность запаха и погодно-климатические условия (скорость и направление ветра). Метод предполагает, что источник запаха находится в направлении, противоположном вектору скорости ветра в момент регистрации жалобы. Точка возможного расположения источника запаха определялась через совмещение направлений ветра и учета влияния «факела загрязнений», имеющего область рассеивания веществ / смеси веществ, формирующих запах. Для уточнения пространственного поиска источников задача решалась с использованием методов нечеткой логики и нечеткого вывода, учитывающих высокий уровень неопределенности. Введена функция принадлежности точки к множеству мест вероятного размещения источника запаха. Идентификация параметров нечеткой модели выполнялась на основе численных экспериментов.

Продемонстрировано, что предложенный подход, базирующийся на анализе статистики жалоб, не только соответствует современным тенденциям прикладного использования теории нечетких множеств, но и решает актуальную задачу идентификации источников загрязнения атмосферного воздуха пахучими веществами. Подходы, представленные в статье, позволяют расширить направления применения теории нечетких множеств для определения причин расхождения данных лабораторного контроля качества воздуха и расчетов рассеивания химических соединений от стационарных и передвижных источников загрязнения.

Ключевые слова: нечеткие множества, запах, атмосферный воздух, здоровье населения, вероятные источники запаха, жалобы, качество жизни, картирование.

© Зайцева Н.В., Май И.В., Кирьянов Д.А., Клейн С.В., Чигвинцев В.М., Клячин А.А., 2024

Зайцева Нина Владимировна – академик РАН, доктор медицинских наук, профессор, научный руководитель (e-mail: znv@fcrisk.ru; тел.: 8 (342) 237-25-34; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2356-1145>).

Май Ирина Владиславовна – доктор биологических наук, профессор, заместитель директора по науке (e-mail: may@fcrisk.ru; тел.: 8 (342) 237-25-47; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0976-7016>).

Кирьянов Дмитрий Александрович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник – заведующий отделом математического моделирования систем и процессов (e-mail: kda@fcrisk.ru; тел.: 8 (342) 237-18-04; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5406-4961>).

Клейн Светлана Владиславовна – профессор РАН, доктор медицинских наук, главный научный сотрудник – заведующий отделом системных методов санитарно-гигиенического анализа и мониторинга (e-mail: kleyn@fcrisk.ru; тел.: 8 (342) 237-18-04; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2534-5713>).

Чигвинцев Владимир Михайлович – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории ситуационного моделирования и экспертно-аналитических методов управления (e-mail: cvm@fcrisk.ru; тел.: 8 (342) 237-18-04; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0345-3895>).

Клячин Алексей Александрович – научный сотрудник отдела системных методов санитарно-гигиенического анализа и мониторинга (e-mail: Klyachin@fcrisk.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4284-4415>).

Проблема появления неприятного запаха в атмосферном воздухе характерна для многих мест проживания населения. Особенно остро эта проблема проявляется в крупных городах и промышленных центрах с высокой плотностью населения, большим количеством предприятий, автотранспорта, мест хранения коммунальных отходов и других проявлений хозяйственной деятельности, свойственных высокоурбанизированным территориям.

Несмотря на работу органов государственной власти по контролю и управлению качеством объектов среды обитания, надзору за выбросами предприятий, нормированию выбросов и сбросов, по организации сбора коммунальных и промышленных отходов, в промышленных центрах стихийно или целенаправленно возникают неучтенные источники загрязнений, формирующие не только повышенные концентрации загрязняющих веществ, но и неприятный запах. Наличие неприятного запаха в жилой застройке проявляется ростом частоты жалоб со стороны населения. Большое количество жалоб является сигналом для лиц, принимающих решения, по устранению неприятного запаха, что зачастую требует идентификации источника (-ов) его формирования.

Анализ релевантных научных исследований по теме загрязнения атмосферного воздуха веществами, обладающими ольфакторным действием, показывает, что у жителей селитебных территорий в зонах влияния объектов – источников запаха чаще регистрируется патология дыхания, сердечно-сосудистые заболевания, заболевания нервной системы, психические расстройства [1, 2]. У лиц под воздействием отмечается снижение качества жизни, наблюдаются эмоциональные отклонения, снижение адаптационного потенциала организма. Несмотря на субъективность оценок, полученных опросным методом, исследования позволяют констатировать наличие повышенных рисков для здоровья, прямо или косвенно обусловленных загрязнением воздуха пахучими веществами [3].

В качестве источников неприятных запахов чаще всего указываются кондитерские фабрики, хлебопекарная промышленность, переработка рыбы, табачные и парфюмерные фабрики, предприятия топливно-энергетического комплекса [4]. Ряд исследователей уверенно выделяет очистные сооружения как основной источник запахового загрязнения [5].

Регистрация запахового загрязнения и связанных с ним рисков для здоровья является существенным аргументом для исследований в области гигиенического нормирования содержания отдельных веществ и их смесей с учетом запаха [6].

Кроме того, проблема организации мер по устранению неприятных запахов во многом связана с отсутствием эффективных методов контроля загрязнения. В обзоре Н.В. Сырчиной с соавт. указывается на основные причины, затрудняющие проведение количественных измерений, которые связаны с субъективным восприятием запахов, сложным мно-

гокомпонентным составом загрязнений, эффектами синергизма, маскировки, нейтрализации, проявляющимися при сочетанном воздействии различных веществ на органы обоняния человека [7]. При этом в качестве методов изучения запахового загрязнения активно применяются опросы населения, анализ жалоб, а также экспертизы с привлечением волонтеров [8].

Следует отметить, что при проведении социологических исследований и анализе жалоб выявляется, что население чаще всего не может идентифицировать запах и определяет его как просто неприятный без уточнения особенностей. Более четкая идентификация характерна для запахов, которые соответствуют конкретным химическим соединениям: сероводороду, аммиаку, природному или бытовому газу. Жалобы на такие запахи позволяют определять возможные технологические процессы, связанные с их появлением, конкретизировать причины и источники.

Интенсивность неприятного запаха характеризуется населением более разнообразно с использованием как порядковых категорий («легкий», «средний», «сильный»), так и ярких эмоциональных определений («ужасный», «зловонный», «удушающий», «нечем дышать» и др.)

Эффективность мер, направленных на ликвидацию неприятных запахов, во многом определяется качеством идентификации источников и причин его возникновения. При этом поиск источников, в основе которого лежит статистика жалоб населения с субъективной оценкой качества и интенсивности запаха, является сложной аналитической задачей.

Основываясь на статистических данных, содержащих субъективные описания запахов, регистрируемых жителями в виде жалоб, зон их локализации, погодно-климатических условий, возникает необходимость в разработке и реализации методики идентификации возможных источников неприятных запахов или областей, в которых он может быть расположен.

Цель исследования – разработка метода определения зоны или зон вероятного расположения источников неприятного запаха на основании статистики жалоб со стороны населения.

Материалы и методы. Ввиду того, что статистика жалоб формируется жителями, не относящимися к категории экспертов, объективные количественные характеристики, оценки качества и интенсивности запаха носят существенно неопределенный характер с высокой степенью эмоциональной окраски. В условиях подобной неопределенности описания и характеристики запаха в качестве научной основы методики идентификации источников запаха предлагается использовать алгоритмы нечеткой логики и нечеткого вывода. Для реализации алгоритмов теории нечеткой логики запах представляется в виде лингвистических переменных, которые отражают его качество и интенсивность, а также детерминированных показателями погодно-климатических условий

(скорость и направление ветра) в точках локализации запаха и регистрации жалоб.

При разработке метода определения возможных мест расположения источников неприятного запаха исходили из концептуального предположения, что он находится в направлении, противоположном вектору скорости ветра, зафиксированному во время регистрации жалобы. Обобщая большое количество жалоб, регистрируемых в различных точках селитебной территории, на основе выполнения операции пересечения лучей, соответствующих направлению ветра, определяли области возможного расположения источника. При этом следует учитывать, что фундаментальные закономерности распространения веществ в атмосферном воздухе (Г.И. Марчук (1982)¹, М.Е. Берлянд с соавт. (1985)²) показывают наличие эффекта рассеивания относительно оси ветра в виде так называемого «факела загрязнений», который создает размытую картину пространственного распределения поля концентраций загрязняющих веществ. Вследствие этого при решении обратной задачи распространения загрязнений в атмосфере предполагали, что источник может быть расположен не на оси ветра, а в нечеткой области, по форме, зеркально соответствующей «факелу загрязнений».

Такое предположение указывает на существенную неопределенность задачи поиска расположения источника и требует применения специальных методов, ориентированных на повышение четкости получаемых областей и количественных оценок. Соответственно, задача поиска неизвестного источника запаха является существенно неопределенной и не может быть решена в парадигме формальной логики. Вместе с тем наличие статистики по субъективной оценке запаха жителями позволяет применить математический аппарат нечетких множеств, нечеткой логики и нечеткого вывода.

Методологической основой разрабатываемого подхода служили теоретические алгоритмы нечеткого вывода, предложенные Е.Н. Mamdani et al.³, основанные на представлении лингвистических переменных в виде нечетких чисел с последующей их агрегацией.

Согласно классическим алгоритмам, процедура применения методов нечеткой логики и нечеткого вывода предполагает выполнение нескольких этапов: фаззификации, агрегации условий и заключений и дефаззификации.

На этапе фаззификации проводится процедура представления параметров системы в виде нечетких множеств. На этапе агрегирования выполняется процедура определения степени истинности условий

по каждому из правил системы нечеткого вывода. Стадия дефаззификации предполагает получение количественного значения для каждой из выходных лингвистических переменных.

Применительно к поставленной задаче пространственное моделирование области вероятного расположения источника запаха (источника выброса пахучего вещества) на основании жалоб населения на неприятные запахи основывали на представлении системы координат в виде нечетких чисел.

Ввиду наличия симметрии при распространении загрязнений в атмосфере применяли полярные координаты с центром в точке регистрации жалобы и главной осью, направленной в противоположную сторону относительно вектора направления скорости ветра. То есть расположение источника запаха будет определяться удаленностью от точки регистрации жалобы (r) и углом отклонения от главной оси (φ). На рис. 1 приведена схема расположения локальной системы полярных координат применительно к произвольной точке регистрации жалобы.

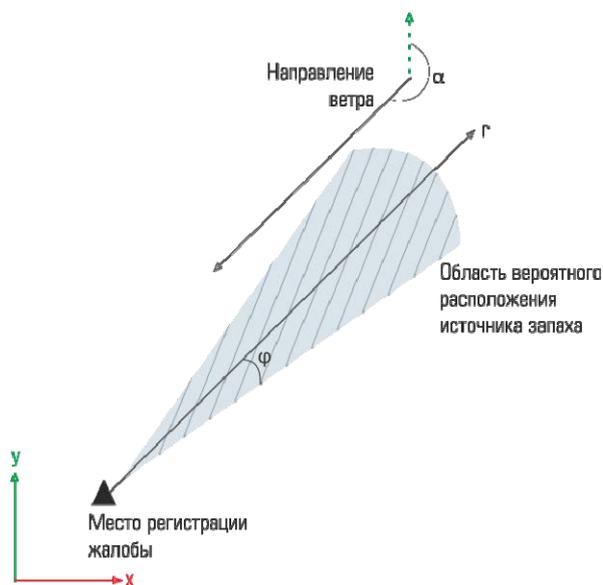


Рис. 1. Схема расположения локальной системы полярных координат применительно к произвольной точке регистрации жалобы

Следуя логике принятых гипотез и неопределенностей, считали, что локальные координаты источника являются функциями лингвистической переменной «Интенсивность запаха» и параметрами рассеивания веществ в атмосфере в зависимости от скорости ветра.

В рамках этапа агрегации, задавая нечеткие координаты для возможного источника запаха в

¹ Марчук Г.И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. – М.: Наука, 1982. – 319 с.

² Физические и методологические принципы установления предельно допустимых выбросов в атмосферу / М.Е. Берлянд, Е.Л. Генихович, И.Г. Грачева, Р.Л. Оникул, С.С. Чичерин // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. – 1985. – № 495. – С. 3.

³ Mamdani E.H., Assilian S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller // Int. J. Man Mach. Stud. – 1975. – Vol. 7, № 1. – P. 1–13. DOI: 10.1016/S0020-7373(75)80002-2

приязке к каждой жалобе и проводя интегрирование функций принадлежности, зарегистрированных на исследуемой территории, для каждой точки проводили определение функций принадлежности к множеству точек возможного расположения источников запаха. В результате проведения процедуры интегрирования формировали области или зоны, в которых источник запаха может быть расположен с большей вероятностью.

В рамках этапа дефаззификации в геоинформационной системе проводили анализ пространственного расположения полученных зон, дифференцируя области по различным критериям и шкалам, применяя цветовую визуализацию и выделяя точки локальных максимумов.

Результаты и их обсуждение. Формирование базы правил нечеткого вывода для задачи поиска местоположения возможного источника запаха выполнялось на основе введения нечетких координат в пространстве узлов регулярной сетки. Для нахождения степени истинности принадлежности точек к множеству возможных мест расположения источников применяли парные нечеткие логические операции объединения. При выполнении процедуры дефаззификации использовали метод центра площади.

На первом этапе идентификации источников неприятного запаха обработку нечеткой информации выполняли введением функции принадлежности точки к множеству мест возможного размещения неизвестного источника. Координаты расположения возможного источника запаха (r, φ) представляли в виде нечетких чисел для каждой жалобы. В качестве функций форм кривых для задания функции принадлежности расстояния до возможного источника запаха использовали трапециевидную форму, а для угла отклонения от оси противоположной направлению ветра – треугольную.

В общем виде трапециевидная форма функции принадлежности задается четверкой параметров (a_1, a_2, a_3, a_4) , которые определяют координаты источника и представляются в виде соотношения:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & 0 \leq r < a_1 \\ \left(\frac{x - a_1}{a_2 - a_1}\right), & a_1 \leq x < a_2 \\ 1, & a_2 \leq x < a_3 \\ \left(\frac{a_4 - x}{a_4 - a_3}\right), & a_3 \leq x < a_4 \\ 0, & x \geq a_4 \end{cases}, \quad (1)$$

где x – координата предполагаемого источника запаха; $\mu(x)$ – функция принадлежности точки с координатой x к множеству точек возможного расположения источника запаха.

Графически трапециевидная функция принадлежности (1) представлена на рис. 2.

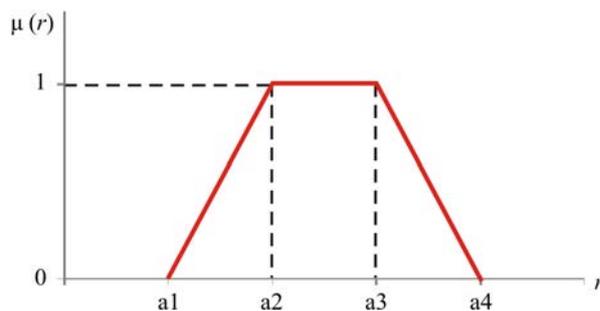


Рис. 2. Графическое представление трапециевидальной функции принадлежности

При равенстве параметров a_2 и a_3 трапециевидная форма трансформируется в треугольную.

Подобное задание функции принадлежности предполагает, что точки, лежащие в интервале $a_2 \leq r < a_3$, принадлежат множеству, в котором точно расположен источник запаха. При этом условия неопределенности задачи поиска источника запаха не дают полной уверенности ни в одной точке исследуемой территории. Вместе с тем, принимая гипотезу, что при наличии жалобы на неприятный запах обязательно существует его источник, расположенный на некотором расстоянии от места регистрации жалобы, условия можно записать в виде:

$$\int_0^{\infty} \mu(r) dr = 1 \quad \text{и} \quad \int_{-\pi}^{+\pi} \mu(\varphi) d\varphi = 1. \quad (2)$$

Выполнение условий (2) приближает правила задания нечеткой координаты к аксиоматике теории вероятностей. Следуя дискретному характеру расчетов рассеивания загрязнений по регулярной сетке, при задании функции принадлежности каждой точки использовали осреднение в некоторой окрестности Δr . То есть вид функции принадлежности для координаты r с 20%-ными размытыми границами задается соотношением:

$$\mu\left(r \pm \frac{1}{2} \Delta r\right) = \begin{cases} \left(\frac{2 \cdot \Delta r}{1,9 \cdot R}\right) \left(\frac{r}{0,2 \cdot R}\right), & 0 \leq r < 0,2 \cdot R \\ \frac{2 \cdot \Delta r}{1,9 \cdot R}, & 0,2 \cdot R \leq r < 0,9 \cdot R \\ \left(\frac{2 \cdot \Delta r}{1,9 \cdot R}\right) \left(\frac{1,1 \cdot R - r}{0,2 \cdot R}\right), & 0,9 \cdot R \leq r < 1,1 \cdot R \\ 0, & r \geq 1,1 \cdot R \end{cases}, \quad (3)$$

где R – параметр нечеткого числа, характеризующего максимально возможное расстояние от места регистрации жалобы до искомого источника запаха, определяется в результате выполнения процедуры идентификации; Δr – окрестность точки возможного расположения источника, для которой определяется функция принадлежности.

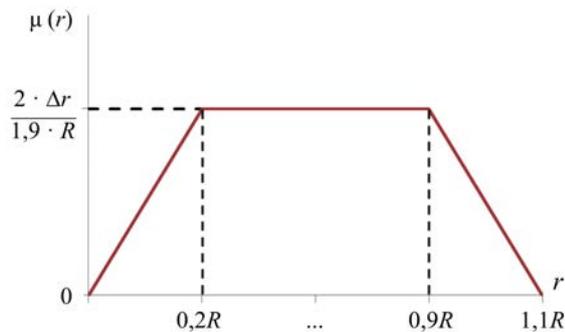


Рис. 3. Графическое представление функции принадлежности для нечеткой координаты: r (расстояние до источника запаха)

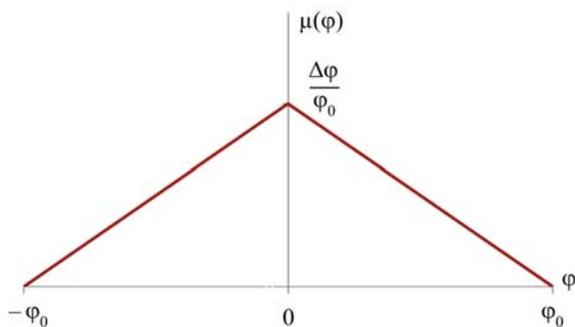


Рис. 4. Графическое представление функции принадлежности для нечеткой координаты: φ (угол отклонения оси расположения источника запаха относительно оси ветра)

Графически функцию принадлежности (3) можно представить в виде трапеции с высотой, зависящей от величины максимального распространения запаха от возможного источника и размера области осреднения (рис. 3).

В качестве величины окрестности точки возможного расположения источника запаха (Δr) может быть выбрана достаточно малая величина, характерная для размеров исследуемой территории. Рекомендуется в качестве величины окрестности применять шаг регулярной сетки, используемый при проведении расчетов рассеивания загрязняющих веществ (например, 100 м).

Аналогичные подходы были использованы для формализации угла отклонения оси расположения источника запаха относительно оси направления ветра, при этом нечеткая координата φ задавалась следующим соотношением:

$$\mu\left(\varphi \pm \frac{1}{2} \Delta\varphi\right) = \begin{cases} 0, & -180 \leq \varphi < -\varphi_0 \\ \frac{\Delta\varphi}{\varphi_0} \left(\frac{\varphi + \varphi_0}{\varphi_0} \right), & -\varphi_0 \leq \varphi < 0 \\ \frac{\Delta\varphi}{\varphi_0} \left(\frac{\varphi_0 - \varphi}{\varphi_0} \right), & 0 \leq \varphi < \varphi_0 \\ 0, & \varphi_0 \leq \varphi < 180 \end{cases}, \quad (4)$$

где φ_0 – параметр нечеткого числа, характеризующего максимальный угол отклонения оси расположения источника запаха от оси ветра, опреде-

ляется в результате выполнения процедуры идентификации; $\Delta\varphi$ – угол отклонения от главной оси, определяющий окрестность точки возможного расположения источника, для которой задается функция принадлежности.

Графическое представление функции принадлежности (4) приведено на рис. 4.

В качестве величины угла отклонения от главной оси, определяющей окрестность точки возможного расположения источника, для которой задается функция принадлежности, применялось значение 1° .

Задавая функции принадлежности для каждой нечеткой координаты расположения источника относительно места регистрации жалобы, все точки исследуемой территории могут быть оценены по принадлежности к множеству точек расположения источника запаха по формуле (5):

$$\mu(r, \varphi) = \mu\left(r \pm \frac{1}{2} \Delta r\right) \mu\left(\varphi \pm \frac{1}{2} \Delta\varphi\right). \quad (5)$$

В рамках этапа агрегирования при применении алгоритма нечеткого вывода выполнялась операция объединения нечетких множеств точек возможного расположения источника запаха, полученных по всем зарегистрированным жалобам. Для этого перед выполнением процедуры интегрирования все результаты расчетов функций принадлежности из локальной полярной системы координат переводились в единую декартову систему координат, принятую при проведении расчетов рассеивания загрязняющих веществ:

$$x = x_i + r \cdot \cos(\alpha_i + 180 + \varphi), \quad (6)$$

$$y = y_i + r \cdot \sin(\alpha_i + 180 + \varphi), \quad (7)$$

где x_i, y_i – координаты места регистрации i -й жалобы в декартовой системе координат;

α_i – угол направления ветра в декартовой системе координат.

Ввиду близости применяемой аксиоматики при задании функции принадлежности нечетких координат и функции плотности вероятности для проведения процедуры интегрирования использовали правило суммирования вероятности для совместных событий [9]:

$$\mu_{\text{сумм}}(x, y) = 1 - \prod_i (1 - \mu_i(x, y)), \quad (8)$$

где $\mu_i(x, y)$ – функция принадлежности точки с координатами (x, y) , рассчитанная для i -й жалобы;

$\mu_{\text{сумм}}(x, y)$ – функция принадлежности точки с координатами (x, y) , рассчитанная для всех жалоб.

Идентификация параметров R и φ_0 нечеткой модели расположения источника запаха (3)–(5) проводилась на основе численных экспериментов по расчету рассеивания типового химического соединения, обладающего запахом, в качестве которого выступал сероводород. Численные эксперименты проводились с использованием программного ком-

плекса: Унифицированная программа расчета загрязнения атмосферы (УПРЗА «Эколог») 4.70.

В рамках проведения расчетов варьировалась высота источника, массовый расход выбрасываемого соединения (г/с) и скорость ветра. При этом массовый выход загрязняющего вещества подбирался исходя из требований формирования концентраций, соответствующих максимальной интенсивности запаха, что соответствует уровню концентрации 10 ПДК⁴ на удалении до 5 км от источника. Такое требование обусловлено необходимостью учета интенсивности запаха. Лингвистическая переменная «Интенсивность запаха» выступала в качестве маркера загрязнения атмосферного воздуха пахучим веществом и определяла вероятный уровень концентраций вещества в точке регистрации жалобы.

Фактическое терм-множество для лингвистической переменной «Интенсивность запаха», основанное на обобщении всех возможных субъективных определений, содержащихся в жалобах, может состоять из большого количества значений, которые можно объединить в ограниченное множество классов без ощутимых потерь информации. Для отработки метода идентификации источника неприятных запахов в качестве терм-множества использовали балльную оценку определения интенсивности запаха (по 5-балльной шкале, принятой в гигиенических исследованиях), полученную на основе опроса экспертов.

Интерпретация терм-множества лингвистической переменной «Интенсивность запаха» проводилась в соответствии с ГОСТ Р 58578-2019 «Правила установления нормативов и контроля выбросов запаха в атмосферу»⁵, на основе которого было проведено сопоставление балльной оценки с уровнями загрязнения атмосферного воздуха пахучими веществами.

В соответствии с расчетами рассеивания при высотах источников 20–40 м (что соответствовало средней высоте источников на исследуемой территории) установлено, что существенных различий в формируемых приземных концентрациях выбрасываемых химических соединений не наблюдается. В качестве модельного источника был принят организованный источник (труба) высотой 20 м. На рис. 5 приведены результаты расчета рассеивания газообразной примеси сероводорода от характерного источника для скоростей ветра 0,5, 1, 2 и 6 м/с.

Из приведенных рисунков видно, что при увеличении скорости ветра «факел загрязнений» вытягивается в длину и одновременно сжимается. При этом расчетный максимум концентраций наблюдается при более сильных ветрах и на расстояниях, более близких к источнику. Расчеты рассеивания показали, что концентрации на пределе обнаружения запаха (на уровне 1 ПДК) могут формироваться на значительных расстояниях (от 4 до 20 км).

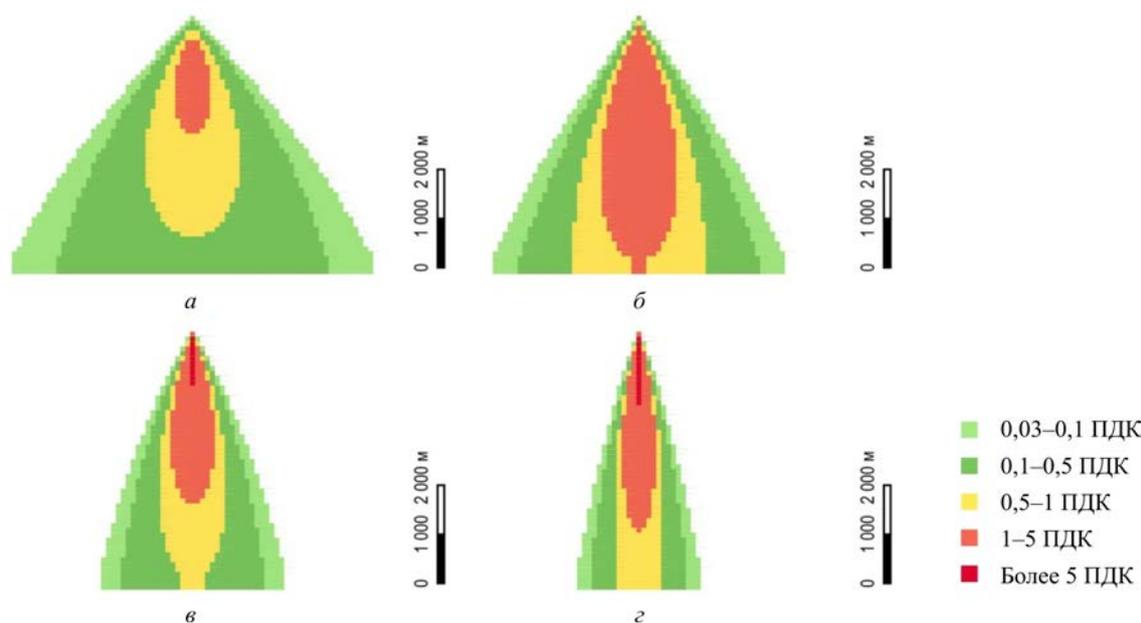


Рис. 5. Результаты расчета рассеивания газообразной примеси от характерного источника для скоростей ветра: а – 0,5 м/с, б – 1 м/с, в – 2 м/с, г – 6 м/с

⁴ ГОСТ Р 58578-2019. Правила установления нормативов и контроля выбросов запаха в атмосферу: национальный стандарт Российской Федерации / утв. и введ. в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 8 октября 2019 г. № 889-ст [Электронный ресурс] // КОДЕКС: электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200168570> (дата обращения: 05.11.2024).

⁵ Там же.

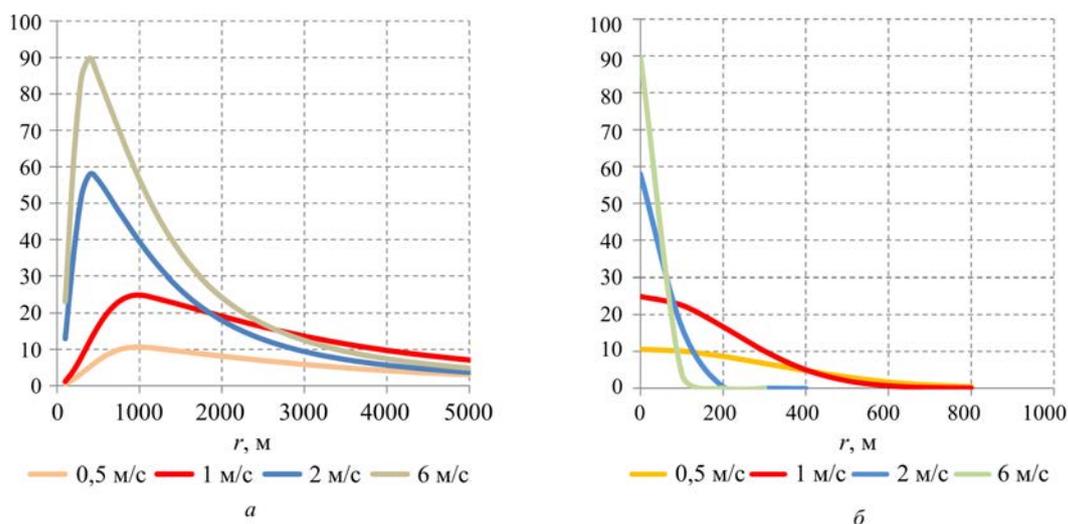


Рис. 6. Графики изменения уровней загрязнения вдоль оси направления ветра (а) и в поперечном направлении (б) от характерного источника выбросов для различных скоростей ветра

Т а б л и ц а 1

Распределение параметра R по интенсивности запаха и скоростям ветра для характерного источника, м

Интенсивность запаха, баллы	Скорость ветра, м/с			
	0,5	1	2	6
1	15868	18579	11058	11129
2	10742	13452	8362	8590
3	8534	11244	7201	7496
4	3408	6117	4504	4957
5	1201	3909	3343	3863

Т а б л и ц а 2

Распределение параметра φ_0 по интенсивности запаха и скоростям ветра для характерного источника, градусы

Интенсивность запаха, баллы	Скорость ветра, м/с			
	0,5	1	2	6
1	43	36	35	26
2	38	32	27	25
3	34	30	26	24
4	22	22	23	14
5	6	17	19	13

Результаты расчетов позволили формализовать зависимость интенсивности загрязнений на различных расстояниях от источника. На рис. 6 приведены графики проекций уровней загрязнения вдоль оси направления ветра и в поперечном направлении.

В результате проведения серии расчетов были получены ориентировочные оценки параметров R и φ_0 для различных скоростей ветра и интенсивности запаха (табл. 1 и 2).

В соответствии с полученными оценками параметров R и φ_0 были заданы нечеткие координаты возможного расположения источника запаха, графическое представление которых для различных скоростей ветра приведено на рис. 7, 8. При выполнении расчетов функций принадлежности по соот-

ношениям (3)–(5) в качестве окрестности точки расположения источников были использованы следующие значения: $\Delta r = 100$ м, $\Delta \varphi = 1^\circ$.

По существу соотношения (3)–(8) и табл. 2 и 3 определяют нечеткую модель поиска места расположения неизвестного источника запаха, основываясь на статистике жалоб населения. Алгоритм выполнения расчетов строится на последовательной обработке всех зарегистрированных жалоб, которые в конечном счете сводятся к получению интегральной оценки функций принадлежности всех точек исследуемой территории в соответствии с соотношением (8). В рамках этапа дефазификации выполняется пространственная интерпретация функций принадлежности точек территории, соответствующих узлам регулярной сетки, с отображением и шкалированием их на топографической карте, используя инструменты ГИС.

В рамках верификации и апробирования модели определения области возможного расположения источника запаха был выполнен расчет функции принадлежности точек по представленному методу, основанному на данных лабораторного контроля содержания сероводорода на посту наблюдений, измеренных в течение календарного года, с известным источником выбросов. На рис. 9 приведены результаты определения области расположения источника для тестового примера.

В приведенном примере пост наблюдений моделировал точку регистрации жалобы. Тестирование метода показало, что полученная область с достаточно высокой надежностью содержит источник загрязнений, что свидетельствует об адекватности представленного алгоритма и его готовности для решения практических задач. Следует отметить, что успешность поиска неизвестных источников неприятного запаха во многом зависит от объема данных, на которых базируются оценки принадлежности.

Исходя из нечетких чисел, представляющих лингвистическую переменную «Интенсивность запаха»

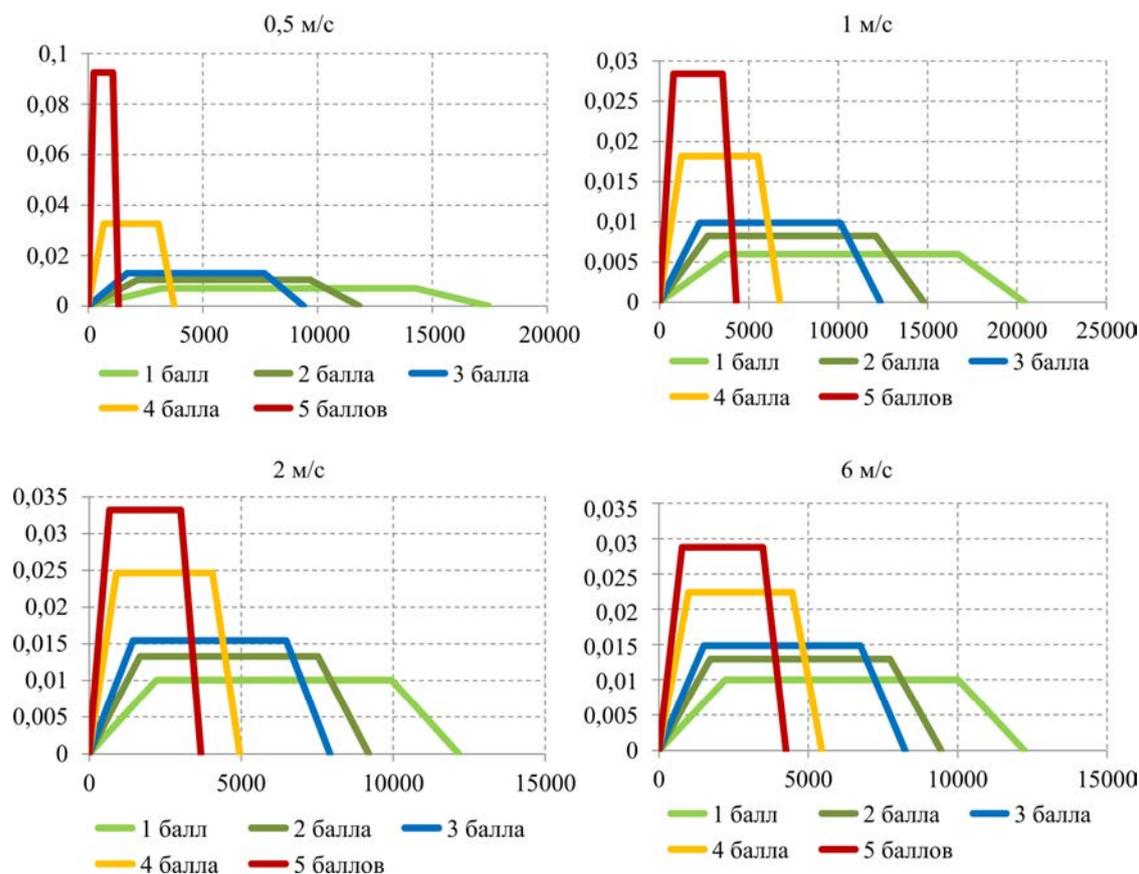


Рис. 7. Графическое представление нечеткой координаты R для различных скоростей ветра

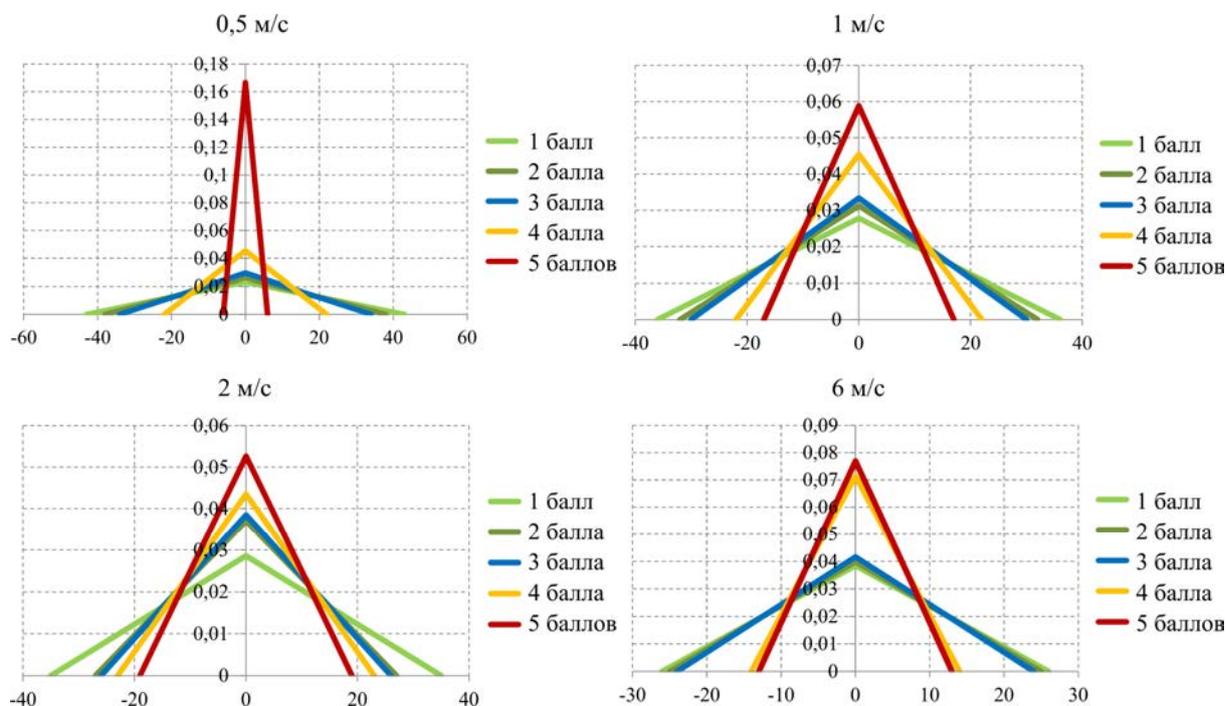


Рис. 8. Графическое представление нечеткой координаты ϕ_0 для различных скоростей ветра

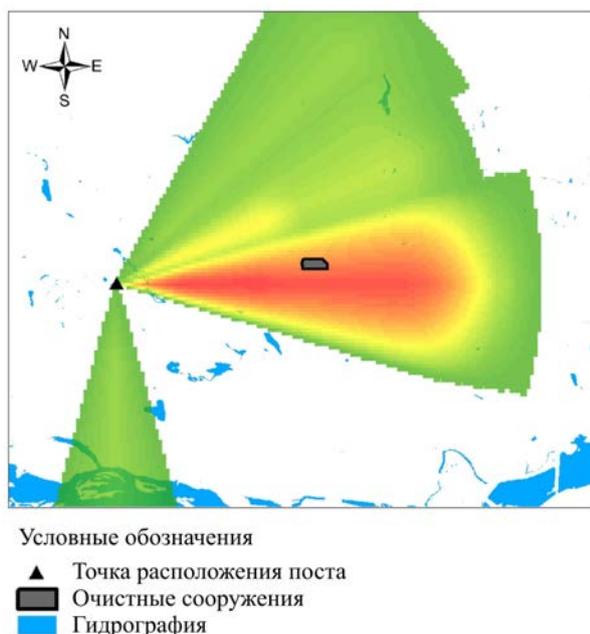


Рис. 9. Результаты определения области расположения источника для тестового примера

(см. рис. 7, 8), средняя оценка функции принадлежности точки (узла регулярной сетки) к множеству мест возможного расположения источника оценивается порядком значений на уровне 10^{-3} . Следовательно, при грубом оценивании для получения достоверных зон расположения источника запаха, характеризующихся величинами функции принадлежности, близкими к 1, необходимо обрабатывать порядка 1000 жалоб, при этом максимальные оценки по большинству из них должны накладываться на одну и ту же область. Хотя такое условие может существенно ограничить успешность идентификации мест расположения источников, в то же время оно снижает вероятность ошибочной трактовки и получения оценки с низкой значимостью.

Разработанная методика может применяться для идентификации источника (источников) неприятного запаха, отражающего разнообразие эмоциональных оценок со стороны населения как по характеру, так и по интенсивности.

Развитие идей и классических алгоритмов нечеткой логики и нечеткого вывода, предложенных Л. Заде (1965), Э. Мамдани (1975), Т. Такаги и М. Сугэно (1985) и др., нашли широкое применение не только в управлении сложными динамическими техническими системами, но и практически во всех областях науки. Подходы, основанные на нечетких множествах, активно используются в решении теоретических и прикладных задач управления социально-экономическими системами, экологии, здравоохранения, гигиены и других сферах хозяйствования.

Практика применения такого подхода в различных областях науки и техники показала, что нечеткая логика является мощным инструментом для обработки неопределенных и неточных данных, в которых присутствуют субъективные, в большинстве случаев качественные оценки явлений и событий, что обеспечивает более гибкий и реалистичный подход к моделированию сложных систем, отражая человеческое мышление и восприятие мира.

Так, исследования в области риск-менеджмента показали, что применение нечетких логических моделей способствует более адекватной оценке финансовых рисков в условиях рыночной неопределенности. Примером риск-менеджмента являются работы S. Piramuthu (1999)⁶, который применил нечеткие логические модели для оценки финансовых рисков в условиях неустойчивого рынка.

Анализ использования аппарата теории нечетких множеств в научных исследованиях российских ученых, выполненных Е.И. Музыко, показал, что наибольший интерес к методам, основанным на нечеткой логике, проявляется в экономической сфере [10]: здесь авторы исследуют методы оценки экономической эффективности затрат на проекты по улучшению качества выпускаемой продукции [11], рисков на этапах жизненного цикла [12], построения оптимальной системы мониторинга по обеспечению продовольственной безопасности [13], а также инвестиционный потенциал промышленных, строительных, высокотехнологических предприятий и промышленного комплекса в целом. Алгоритмы нечеткой логики и нечеткого вывода активно используются для анализа и прогнозирования характеристик эколого-экономической безопасности техногенных систем на уровне Российской Федерации, регионов и отдельных муниципальных образований [14–20].

Анализ публикаций по практике применения нечеткой логики в области риск-менеджмента, применительно к медицинским, экологическим и гигиеническим задачам, также показал, что подход успешно применяется для управления сложными медико-демографическими процессами, при этом в основе их решения лежит разработка экспертных систем, имитирующих принятие решений экспертами в условиях неопределенности [14–16]. С развитием информационных и экспертных систем, ориентированных на обработку плохо определенной информации, имеющей пространственную привязку, особую значимость приобретают алгоритмы совмещения нечетких моделей с методами геоинформатики и искусственного интеллекта, предполагающие моделирование логики эксперта, осуществляющего анализ данных и принятие решений [23–26].

⁶ Piramuthu S. Financial credit-risk evaluation with neural and neurofuzzy systems // European Journal of Operational Research. – 1999. – Vol. 112, № 2. – P. 310–321.

Предложенный подход поиска источника неприятного запаха, основанный на анализе статистики жалоб населения, не только находится в тренде развития прикладной сферы использования теории множеств, но и решает актуальную прикладную проблему, связанную с идентификацией источников загрязнения атмосферного воздуха.

По существу метод позволяет находить решение обратной задачи рассеивания загрязняющих веществ, которая относится к классу некорректных и требует введения дополнительных условий и критериев оптимизации. В приведенном решении в качестве критерия оптимизации выступает функция принадлежности точки к множеству возможных мест расположения источника загрязнений. Максимум функции указывает на его наиболее вероятное местоположение.

Выводы. В представленных материалах показано, что существенно неопределенная задача, к которой относится задача поиска неизвестного источника запахового загрязнения, имеет формальное решение. Причем точность решения во многом определяется объемом и качеством статистических данных, характеризующих интенсивность запаха.

Использование методологии нечеткой логики в значительной мере было обусловлено исходной ин-

формацией в виде жалоб населения, принимающих значения лингвистических переменных, трудно поддающихся обработке стандартными методами статистического анализа.

Показано, что предложенный подход поиска источника неприятного запаха, основанный на анализе статистики жалоб населения, не только находится в тренде развития прикладной сферы использования теории множеств, но и решает актуальную прикладную проблему, связанную с идентификацией источников загрязнения атмосферного воздуха.

Кроме того, предлагаемые в настоящей статье подходы позволяют определить перспективные направления использования теории нечетких множеств для идентификации причин расхождения данных лабораторного контроля качества атмосферного воздуха и результатов расчета рассеивания химических соединений от стационарных и передвижных источников, основываясь на статистических данных с постов наблюдений.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

1. Гошин М.Е., Бударина О.В., Демина Н.Н. Анализ состояния здоровья населения, проживающего в условиях загрязнения атмосферного воздуха пахучими веществами (обзор литературы) // Гигиена и санитария. – 2020. – Т. 99, № 9. – С. 930–938. DOI: 10.47470/0016-9900-2020-99-9-930-938
2. Бударина О.В., Сабирова З.Ф., Шипулина З.В. Анализ международного опыта изучения влияния загрязнения атмосферного воздуха запахом на здоровье населения // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2019. – № 5. – С. 88–92.
3. Гошин М.Е., Бударина О.В., Ингель Ф.И. Запахи в атмосферном воздухе: анализ связи с состоянием здоровья и качеством жизни взрослого населения города с развитой пищевой промышленностью // Гигиена и санитария. – 2020. – Т. 99, № 12. – С. 1339–1345. DOI: 10.47470/0016-9900-2020-99-12-1339-1345
4. Чепегин И.В., Андрияшина Т.В. Выбросы пахучих веществ в атмосферу. Проблемы и решения // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – Т. 16, № 10. – С. 80–83.
5. Проблемы запахов в атмосферном воздухе от очистных сооружений: нормирование, контроль и законодательное регулирование / О.В. Бударина, М.А. Пинигин, З.Ф. Сабирова, Л.А. Федотова // Водоснабжение и санитарная техника. – 2017. – № 8. – С. 20–26.
6. Перспективы развития и гармонизации гигиенического нормирования с учётом риска возникновения запаха в атмосферном воздухе / С.В. Кузьмин, О.В. Бударина, Ю.А. Рахманин, М.А. Пинигин, Н.С. Додина, С.А. Сковронская // Гигиена и санитария. – 2024. – Т. 103, № 2. – С. 96–103. DOI: 10.47470/0016-9900-2024-103-2-96-103
7. Сырчина Н.В., Пилип Л.В., Ашихмина Т.Я. Контроль запахового загрязнения атмосферного воздуха (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. – 2022. – № 2. – С. 26–34. DOI: 10.25750/1995-4301-2022-2-026-034
8. Роль социологических методов исследований в осуществлении эколого-гигиенического мониторинга территорий / А.К. Маковецкая, Л.В. Хрипач, М.Е. Гошин, О.В. Бударина, А.В. Карманов // Гигиена и санитария. – 2023. – Т. 102, № 9. – С. 902–908. DOI: 10.47470/0016-9900-2023-102-9-902-908
9. Алгоритмические основы нечеткой процедуры комплексного оценивания объектов различной природы / А.О. Алексеев, А.С. Калентьева, А.В. Вычегжанин, Д.В. Климец // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 3, Ч. 3. – С. 469–474.
10. Музыко Е.И. Отражение научного интереса к применению метода нечетких множеств для анализа эффективности инновационных проектов в диссертационных исследованиях в России // Идеи и идеалы. – 2018. – Т. 10, № 3, Ч. 2. – С. 50–65. DOI: 10.17212/2075-0862-2018-3.2-50-65
11. Кублин И.М., Ханин В.М., Тинякова В.И. О применении аппарата нечетких множеств для оценки экономической эффективности затрат на улучшение качества выпускаемой продукции // Экономика и предпринимательство. – 2015. – № 5–1 (58). – С. 619–623.

12. Бабенков В.И., Гасюк Д.П., Дубовский В.А. Метод оценивания рисков на этапах жизненного цикла образцов вооружения и военной техники // Вооружение и экономика. – 2020. – № 3 (53). – С. 59–65.
13. Ведерников Ю.В., Евстафьев А.С., Проценко Д.С. Методология построения системы мониторинга критически важных параметров продовольственной безопасности России // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. – 2015. – № 7–8 (85–86). – С. 22–30.
14. Рогачев А.Ф., Кузьмин В.А. Моделирование эколого-экономических систем с использованием алгоритмов нечеткого вывода // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2013. – № 1 (29). – С. 230–235.
15. Потравный И.М., Новоселов А.Л., Новоселова И.Ю. Развитие методов экономической оценки ущерба от загрязнения окружающей среды и их практическое применение // Экономическая наука современной России. – 2018. – № 3 (82). – С. 35–48.
16. Санжапов Б.Х., Садовникова Н.П. Согласование целей при эколого-экономическом обосновании градостроительного проекта с учетом ограничений на значения характеристик, входящих в систему средств, в условиях нечеткой информации // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2011. – № 21 (40). – С. 151–159.
17. Санжапов Б.Х., Садовникова Н.П. Применение методов мягких вычислений и когнитивного моделирования в задачах прогнозирования экологической безопасности строительства // Экология урбанизированных территорий. – 2011. – № 4. – С. 36–40.
18. Санжапов Б.Х., Мурадов А.А., Санжапов Р.Б. Оценка экологической безопасности автотранспортной системы города // Интернет-вестник ВолГАСУ. – 2013. – № 2 (27). – С. 30.
19. Алексеева Е.И., Арефьева Е.В. Модели оценки подверженности застроенных территорий воздействию опасных природных процессов с климатическим фактором на основе систем нечеткого логического вывода типа Мамдани и типа Сугено // Технологии гражданской безопасности. – 2022. – Т. 19, № 3 (73). – С. 25–31.
20. Цховребов Э.С., Слесарев М.Ю. Методы оценки нечетких показателей экологической безопасности городских территорий на стадии разработки проектной и проектной документации // Социология города. – 2022. – № 3. – С. 64–82. DOI: 10.35211/19943520_2022_3_64
21. Средства поддержки принятия решений при диагностике новообразований челюстно-лицевой области / Г.Б. Бурдо, С.Н. Лебедев, Ю.В. Лебедева, И.С. Лебедев // Врач и информационные технологии. – 2022. – № 4. – С. 40–51. DOI: 10.25881/18110193_2022_4_40
22. Серобапов А.С. Определение интервалов термов входного параметра в медицинской экспертной системе диагностики на основе алгомеративной кластеризации // Информационные технологии и автоматизация управления: материалы XIII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов, работников образования и промышленности / отв. ред. А.В. Никонов. – Омск: Омский государственный технический университет, 2022. – С. 248–252.
23. Гавриленко Т.В., Адмаев О.В. Использование теории нечетких множеств при анализе экологического состояния придорожного пространства // Хвойные бореальной зоны. – 2012. – Т. 30, № 5–6. – С. 79–84.
24. Соловьев А.А. Методы геоинформатики и нечеткой математики в анализе геофизических // Чебышевский сборник. – 2018. – Т. 19, № 4. – С. 194–214. DOI: 10.22405/2226-8383-2018-19-4-194-214
25. Павлова А.И., Каличкин В.К. Автоматизированное картографирование сельскохозяйственных земель с помощью нейронной экспертной системы, интегрированной с ГИС // Достижения науки и техники АПК. – 2011. – № 1. – С. 5–7.
26. Баденко В.Л. Анализ экологических рисков в ГИС на основе нечетких множеств // Информация и космос. – 2013. – № 3–4. – С. 78–84.

Методические подходы к пространственной идентификации вероятных источников неприятного запаха в атмосферном воздухе на основе методов нечеткой логики / Н.В. Зайцева, И.В. Май, Д.А. Кирьянов, С.В. Клейн, В.М. Чигвинцев, А.А. Клячин // Анализ риска здоровью. – 2024. – № 4. – С. 14–26. DOI: 10.21668/health.risk/2024.4.02

UDC 504.3.054: 613.157: 510.22
DOI: 10.21668/health.risk/2024.4.02.eng



Research article

METHODICAL APPROACHES TO SPATIAL IDENTIFICATION OF PROBABLE SOURCES OF OBNOXIOUS ODORS IN AMBIENT AIR BASED ON FUZZY LOGIC

N.V. Zaitseva, I.V. May, D.A. Kiryanov, S.V. Kleyn, V.M. Chigvintsev, A.A. Klyachin

Federal Scientific Center for Medical and Preventive Health Risk Management Technologies,
82 Monastyrskaya St., Perm, 614045, Russian Federation

The article describes a task of searching for an unknown source of odor pollution. This task is classified as 'considerably uncertain', for which formal solution is proposed. The issue of obnoxious odor is relevant for many residential areas in large cities and industrial centers. Despite strict governmental control of emissions, including those from recycling facilities, undetermined pollution sources often become a reason for numerous people's complaints. Odor pollution is known to affect human health including the respiratory, cardiovascular and nervous systems; to reduce life quality and adaptation capacity. Industrial enterprises, treatment and recycling facilities are the most frequent sources of odor pollution. Complexity of air quality control is caused by subjectivity typical for odor perception and their multicomponent structure.

The suggested approach to searching for obnoxious odor sources is based on using statistical data about complaints made by people and up-to-date methods of the fuzzy set theory. Statistical data on people's complaints are subjective and emotional in their essence. In this method, an odor is represented as a linguistic variable that considers odor quality and intensity and weather and climatic conditions (wind speed and direction). The method assumes that an odor source is located in the direction opposite to the wind speed vector at the moment a complaint was registered. A possible location of an odor source was identified by superposing wind directions and considering impacts of a 'pollution plume', which had an area of dispersion of substances / a mixture of substances responsible for an odor. To perform more precise spatial searching for odor sources, the task was solved using fuzzy logic methods and a fuzzy conclusion considering a high level of uncertainty. The function of belonging was introduced to identify whether a point belonged to the multitude of probable locations of an odor source. Fuzzy model parameters were identified by using numeric experiments.

The suggested approach, which is based on analyzing statistical data about people's complaints, has been shown to not only conform to up-to-date trends in applied use of the fuzzy set theory but also to be able to solve the relevant task of identifying sources of odor pollution in ambient air. The approaches outlined in the article expand a sphere where the fuzzy set theory can be used introducing a new application trend for it, which is to determine reasons for differences between data obtained by laboratory control of ambient air quality and calculated dispersion of chemical emissions from stationary and mobile pollution sources.

Keywords: fuzzy sets, odor, ambient air, population health, probable odor sources, complaints, life quality, mapping.

References

1. Goshin M.E., Budarina O.V., Demina N.N. Analysis of the health status of the population living in conditions of air pollution with odorous substances (literature review). *Gigiena i sanitariya*, 2020, vol. 99, no. 9, pp. 930–938. DOI: 10.47470/0016-9900-2020-99-9-930-938 (in Russian).
2. Budarina O.V., Sabirova Z.F., Shipulina Z.V. Analiz mezhdunarodnogo opyta izucheniya vliyaniya zagryazneniya atmosfer-nogo vozdukhа zapakhom na zdorov'e naseleniya [Analysis of international experience in studying the impact of ambient air pollution by odor on public health]. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*, 2019, no. 5, pp. 88–92 (in Russian).
3. Goshin M.E., Budarina O.V., Ingel F.I. The odours in the ambient air: analysis of the relationship with the state of health and quality of life in adults residing in the town with food industries. *Gigiena i sanitariya*, 2020, vol. 99, no. 12, pp. 1339–1345. DOI: 10.47470/0016-9900-2020-99-12-1339-1345 (in Russian).

© Zaitseva N.V., May I.V., Kiryanov D.A., Kleyn S.V., Chigvintsev V.M., Klyachin A.A., 2024

Nina V. Zaitseva – Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Medical Sciences, Professor, Scientific Director (e-mail: znv@fcrisk.ru; tel.: +7 (342) 237-25-34; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2356-1145>).

Irina V. May – Doctor of Biological Sciences, Professor, Deputy Director for Research (e-mail: may@fcrisk.ru; tel.: +7 (342) 237-25-47; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0976-7016>).

Dmitrii A. Kiryanov – Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher – Head of the Department for Mathematical Modeling of Systems and Processes (e-mail: kda@fcrisk.ru; tel.: +7 (342) 237-18-04; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5406-4961>).

Svetlana V. Kleyn – Professor of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Medical Sciences, Chief Researcher – Head of the Department for Systemic Procedures of Sanitary-Hygienic Analysis and Monitoring (e-mail: kleyn@fcrisk.ru; tel.: +7 (342) 237-18-04; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2534-5713>).

Vladimir M. Chigvintsev – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Researcher at Mathematic Modeling of Systems and Processes Department (e-mail: cvm@fcrisk.ru; tel.: +7 (342) 237-18-04; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0345-3895>).

Aleksei A. Klyachin – Researcher of the Department for Systemic Procedures of Sanitary-Hygienic Analysis and Monitoring (e-mail: Klyachin@fcrisk.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4284-4415>).

4. Chepegin I.V., Andriyashina T.V. Vybrosy pakhuchikh veshchestv v atmosferu. Problemy i resheniya [Emissions of odorous substances into the atmosphere. Problems and solutions]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2013, vol. 16, no. 10, pp. 80–83 (in Russian).
5. Budarina O.V., Pinigin M.A., Sabirova Z.F., Fedotova L.A. Odor problems in ambient air of the wastewater treatment facilities: regulation, control and legislative regulation. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika*, 2017, no. 8, pp. 20–26 (in Russian).
6. Kuzmin S.V., Budarina O.V., Rakhmanin Yu.A., Pinigin M.A., Dodina N.S., Skovronskaya S.A. Prospects of the development and harmonization of hygienic standardization taking into account the risk of odour in the ambient air. *Gigiena i sanitariya*, 2024, vol. 103, no. 2, pp. 96–103. DOI: 10.47470/0016-9900-2024-103-2-96-103 (in Russian).
7. Syrchina N.V., Pilip L.V., Ashikhmina T.Ya. Control of odor pollution of atmospheric air (review). *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*, 2022, no. 2, pp. 26–34. DOI: 10.25750/1995-4301-2022-2-026-034 (in Russian).
8. 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*, 2023, vol. 102, no. 9, pp. 902–908. DOI: 10.47470/0016-9900-2023-102-9-902-908 (in Russian).
9. Alekseev A.O., Kalentyeva A.S., Vychezhnanin A.V., Klimets D.V. Algorithmic basics of fuzzy procedure of integrated assessment of different nature objects. *Fundamental'nye issledovaniya*, 2014, no. 3, pt 3, pp. 469–474 (in Russian).
10. Muzyko E. Considerations on the Research Interest to the Application of Fuzzy Sets Method for the Analysis of the Effectiveness of Innovation Projects in Dissertations in Russia. *Idey i idealy*, 2018, vol. 10, no. 3, pt 2, pp. 50–65. DOI: 10.17212/2075-0862-2018-3.2-50-65 (in Russian).
11. Kublin I.M., Khanin V.M., Tinyakova V.I. About the application of fuzzy sets to evaluate the cost-effectiveness to improve product quality. *Ekonomika i predprinimatel'stvo*, 2015, no. 5–1 (58), pp. 619–623 (in Russian).
12. Babenkov V.I., Gasyuk D.P., Dubovsky V.A. Method of risk assessment at the weapons and military equipment samples life cycle stages. *Vooruzhenie i ekonomika*, 2020, no. 3 (53), pp. 59–65 (in Russian).
13. Vedernikov Yu.V., Evstafyev A.S., Protsenko D.S. Methodology of creation of system monitoring of crucial parameters food safety of Russia. *Voprosy oboronnoy tekhniki. Seriya 16: Tekhnicheskie sredstva protivodeistviya terrorizmu*, 2015, no. 7–8 (85–86), pp. 22–30 (in Russian).
14. Rogachev A.F., Kuz'min V.A. Modelirovanie ekologo-ekonomicheskikh sistem s ispol'zovaniem algoritmov nechetkogo vyvoda [[Modeling of ecological-economic systems using fuzzy inference algorithms]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professional'noe obrazovanie*, 2013, no. 1 (29), pp. 230–235 (in Russian).
15. Potravny I.M., Novosselov A.L., Novosselova I.Ju. The development of economic assessment methods of damage from environmental pollution and their practical application. *Ekonomicheskaya nauka sovremennoy Rossii*, 2018, no. 3 (82), pp. 35–48 (in Russian).
16. Sanzhapov B.Kh., Sadovnikova N.P. Conformance purposes with ecological and economic justification of the urban planning project iro restrictions to property values in conditions the fuzzy information. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2011, no. 21 (40), pp. 151–159 (in Russian).
17. Sanzhapov B.Kh., Sadovnikova N.P. Primenenie metodov myagkikh vychislenii i kognitivnogo modelirovaniya v zadachakh prognozirovaniya ekologicheskoi bezopasnosti stroitel'stva [Application of soft computing and cognitive modeling methods in forecasting environmental safety of construction]. *Ekologiya urbanizirovannykh territorii*, 2011, no. 4, pp. 36–40 (in Russian).
18. Sanzhapov B.Kh., Muradov A.A.O., Sanzhapov R.B. Environmental safety assessment of urban transport system. *Internet-vestnik VolgGASU*, 2013, no. 2 (27), pp. 30 (in Russian).
19. Alekseeva E.I., Arefyeva E.V. Models for assessing the exposure of built-up areas to the impact of natural hazards with a climatic factor based on fuzzy inference systems of the Mamdani and Sugeno types. *Tekhnologii grazhdanskoj bezopasnosti*, 2022, vol. 19, no. 3 (73), pp. 25–31 (in Russian).
20. Tskhovrebov E.S., Slesarev M.Yu. Methods of evaluation of fuzzy indicators of environmental safety of urban territories at the stage of development of pre-project and project documentation. *Sotsiologiya goroda*, 2022, no. 3, pp. 64–82. DOI: 10.35211/19943520_2022_3_64 (in Russian).
21. Burdo G.B., Lebedev S.N., Lebedeva Y.V., Lebedev I.S. Decision support tools for maxillofacial tumors diagnostics. *Vrach i informatsionnye tekhnologii*, 2022, no. 4, pp. 40–51. DOI: 10.25881/18110193_2022_4_40 (in Russian).
22. Serobabov A. Determination of input parameter term intervals in a medical expert diagnostic system based on algorithmic clustering. *Informatsionnye tekhnologii i avtomatizatsiya upravleniya: materialy XIII Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov, aspirantov, rabotnikov obrazovaniya i promyshlennosti*. In: A.V. Nikonov ed. Omsk, Omsk State Technical University Publ., 2022, pp. 248–252 (in Russian).
23. Gavrilenko T.V., Admaev O.V. Ispol'zovanie teorii nechetkikh mnozhestv pri analize ekologicheskogo sostoyaniya pridorozhnogo prostranstva [Using the fuzzy sets theory in analyzing the ecological state of the roadside space]. *Khvoynye boreal'noi zony*, 2012, vol. 30, no. 5–6, pp. 79–84 (in Russian).
24. Soloviev A.A. Methods of geoinformatics and fuzzy mathematics in geophysical data analysis. *Chebyshevskii sbornik*, 2018, vol. 19, no. 4, pp. 194–214. DOI: 10.22405/2226-8383-2018-19-4-194-214 (in Russian).
25. Pavlova A.I., Kalichkin V.K. Automated cartography of the agricultural lands with the neuron expert system, integrated with HIS. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*, 2011, no. 1, pp. 5–7 (in Russian).
26. Badenko V.L. Environmental risk analysis in GIS based on fuzzy sets. *Informatsiya i kosmos*, 2013, no. 3–4, pp. 78–84 (in Russian).

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. *Health Risk Analysis*, 2024, no. 4, pp. 14–26. DOI: 10.21668/health.risk/2024.4.02.eng

Получена: 11.11.2024

Одобрена: 17.12.2024

Принята к публикации: 22.12.2024