

РАСПРЕДЕЛЕННЫЕ НЕЧЕТКИЕ ОЦЕНКИ В РАНЖИРОВАНИИ ВЛИЯЮЩИХ НА ЭКОЛОГИЧЕСКУЮ БЕЗОПАСНОСТЬ АТМОСФЕРЫ УРБАНИЗИРОВАННОЙ ТЕРРИТОРИИ ОБЪЕКТОВ

Б. Х. Санжапов

Санжапов Булат Хизбуллович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Клиническая инженерия и технологии искусственного интеллекта», Волгоградский государственный медицинский университет, г. Волгоград, Российская Федерация, тел.: +7 (904) 424-11-15; e-mail: sbkh@mail.ru;

В статье разработан метод поддержки принятия решений на ранней стадии исследования вариантов проекта, загрязняющего атмосферу объектов. Аргументирована рациональность применения индекса загрязнения атмосферы (AQI) для агрегированной оценки степени загрязнения атмосферы урбанизированной территории. *Метод.* В работе обоснована целесообразность использования аппарата теории нечетких множеств для представления начальных сведений. Разработан алгоритм для представления информации в виде распределенных нечетких оценок на лингвистической шкале. Предложен метод упорядочения объектов по степени загрязнения атмосферы городской среды. *Результаты и обсуждение.* Эффективность разработанного метода проиллюстрирована при решении модельного примера ранжирования альтернатив. Приведенная методика может применяться как дополнительный инструмент для представления и анализа нечеткой информации.

Ключевые слова: нечеткое множество, распределенная нечеткая оценка, поддержка принятия решений, ранжирование, урбанизированная территория, экологическая безопасность.

DISTRIBUTED FUZZY ESTIMATIONS IN RANKING OBJECTS IMPACTING THE ATMOSPHERIC ECOLOGICAL SAFETY OF AN URBANIZED AREA

B. Kh. Sanzhapov

Sanzhapov Bulat Khizbullovich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of Clinical Engineering and Artificial Intelligence Technologies Department, Volgograd State Medical University, Volgograd, Russian Federation, phone: +7 (904) 424-11-15; e-mail: sbkh@mail.ru

The paper develops a decision support method at the early stage of evaluating options for projects of objects that pollute the atmosphere. The rationality of using the Air Quality Index (AQI) for an aggregated assessment of the degree of atmospheric pollution in an urbanized area is substantiated. *Method.* The paper justifies the feasibility of using the fuzzy set theory apparatus to represent initial information. An algorithm has been developed to present information in the form of distributed fuzzy estimations on a linguistic scale. A method for ranking objects according to the degree of atmospheric pollution in the urban environment is proposed. *Results and Discussion.* The effectiveness of the developed method is illustrated by solving a model example of ranking alternatives. The presented methodology can be applied as an additional tool for representing and analyzing fuzzy information.

Keywords: fuzzy set, distributed fuzzy estimation, decision support, ranking, urbanized area, ecological safety.

Введение

Экология городских территорий оказывает непосредственное влияние на здоровье граждан, как на краткосрочном отрезке времени, так и в течение продолжительного периода. Отрицательное влияние загрязнителей атмосферного воздуха на здоровье человека достаточно полно исследовано во многих публикациях, в частности, такие проблемы рассмотрены в работах [1–4]. Поэтому исследование экологических проблем города должно быть связано с оценкой влияния на его экологическую безопасность действующих и планируемых к вводу объектов, загрязняющих атмосферу окружающей среды. Проблемы оптимизации работы действующих предприятий в городской черте, с целью минимизации негативного влияния выбросов загрязняющих веществ (далее – ЗВ) на здоровье населения, в условиях полноты численной информации, успешно исследовались в работах [5–8]. Вариант реализации проекта создаваемого объекта и выбор режима управления действующих предприятий может быть выбран

из соответствующего конечного множества, каждый элемент которого влияет на экологию окружающей среды. В этой связи, в условиях неполноты информации, объективно встает вопрос об оценке влияния планируемого или действующего объекта на окружающую среду и выбор из рассматриваемого множества альтернативных вариантов наиболее приоритетный проект или способ управления существующим объектом с точки зрения экологического воздействия на атмосферу урбанизированной территории. Существуют известные методы расчета продвижения ЗВ от их источника до конкретной локации городской территории. Их применение в условиях неполноты информации довольно затруднительно. Например, модели, основанные на распределении Гаусса, модели Лагранжа и Эйлера требуют точного знания метеорологических условий: скорость ветра, его направление, влажность воздуха и др. [9,10]. Такое описание всех необходимых параметров на ранней стадии исследования проекта загрязняющего атмосферу объекта или при выборе варианта

управления действующего сооружения довольно затруднительно. Также не всегда представляется возможным исследовать экстремальные значения концентраций загрязняющих веществ. Поэтому целесообразно использовать методику расчета продвижения этих веществ в атмосфере, позволяющую определить их максимальные значения концентраций [11]. В дальнейшем эти показатели будут применяться для решения задачи упорядочения объектов по степени важности минимального влияния на экологию городской среды.

Метод

Использование принятого в России агрегированного показателя оценки загрязнения атмосферы – индекса загрязнения атмосферы (далее – ИЗА) – для ранжирования объектов довольно ограничительно, ввиду небольшого количества рассматриваемых классов – четыре и требования знать точные значения концентраций загрязняющих веществ [12]. Более того, довольно проблематично разбить отрезок допустимых значений ИЗА на отрезки по степени

влияния на здоровье человека, ввиду нелинейности этой зависимости от концентраций ЗВ.

В связи с этим, для решения такой задачи упорядочения объектов по степени влияния на окружающую среду, используется показатель *AQI* (индекс качества атмосферы). Эта числовая интервальная характеристика предложена агентством по защите окружающей среды США (*EPA*). Базовыми показателями этого индекса являются следующие ЗВ: NO_2 , SO_2 , CO , $PM_{2.5}$, PM_{10} , O_3 [13,14]. В таблице 1 приведены градации индекса загрязнения атмосферы и, в качестве примера, контрольные точки концентраций мелкодисперсной пыли $PM_{2.5}$, разделяющие принятый интервал значений [0, 500] на m групп (здесь $m = 6$) [13,14]. Такие значения других контрольных точек рассматриваемых концентраций ЗВ приведены в [13, 14]. Будем считать в дальнейшем, что лингвистические оценки интервалов имеют соответствие с порядковой шкалой $E = \{e_1, \dots, e_m\}$. Для визуализации этой шкалы используются также цветовые характеристики категорий *AQI* (табл.1) [14].

Таблица 1

Категории *AQI* [14]

Table 1

Categories *AQI* [14]

№ п/п	Категория <i>AQI</i> (шкала $E = \{e_1, \dots, e_6\}$).	Индекс (<i>AQI</i>)	Концентрации $PM_{2.5}$ (мкг/м ³)
	1	2	3
1.	Хорошо – e_1 . Зеленый. Воздух чист, риска для здоровья нет	0–50	0.0–9.0
2.	Умеренно – e_2 . Желтый. Качество приемлемое, но для очень чувствительных людей возможен дискомфорт	51–100	9.1–35.4
3.	Вредно для чувствительных групп населения – e_3 . Оранжевый. Дети, пожилые и люди с заболеваниями легких могут почувствовать симптомы	101–150	35.5–55.4
4.	Вредно – e_4 . Красный. Каждый может начать испытывать последствия для здоровья	151–200	55.5–125.4
5.	Очень вредно – e_5 . Фиолетовый. Серьезное предупреждение о риске для всего населения	201–300	125.5–225.4
6.	Опасно – e_6 . Бордовый. Чрезвычайная ситуация, находиться на улице не рекомендуется	301–500	225.5–325.4

Значения индекса загрязнения среды городского поселения I_p загрязнителем атмосферного воздуха p вычисляется по формуле [14]:

$$I_p = \frac{I_{HI} - I_{LO}}{BP_{HI} - BP_{LO}} (C_p - BP_{LO}) + I_{LO}. \quad (1)$$

В формуле (1) приняты следующие обозначения: C_p – концентрация загрязнителя p , BP_{HI} – контрольная точка концентрации ЗВ p , большее или равное C_p , BP_{LO} – контрольная точка концентрации ЗВ p , меньшее или равное C_p , I_{HI} – значение *AOI*, соответствующее BP_{HI} , I_{LO} – значение *AOI*, соответствующее I_{LO} .

Для расчета агрегированного значения индекса I_{agg} используется выражение [13, 14]

$$I_{agg} = \max(I_1, \dots, I_m). \quad (2)$$

Рассматриваемые в формуле (1) значения концентраций ЗВ в локальной точке города являются числовыми данными. Как следствие, значение агрегированного показателя *AQI* чувствительно к изменению используемых значений

концентраций ЗВ. Ввиду того, что довольно сложно определить точные прогнозируемые числовые значения концентраций ЗВ, влияющие, в частности, на удовлетворенность жителей [15], целесообразно считать эти показатели нечеткими величинами [16, 17]. Эффективность применения аппарата теории нечетких множеств для решения задач продвижения ЗВ в атмосфере подтверждена в статьях [5, 7]. Таким образом, будем считать, что для каждого ЗВ задано нечеткое множество [16, 17]. Формально, нечеткое множество A определяется как совокупность пар:

$$A = \{(x, \mu_A(x)) | x \in U\},$$

$$\mu_A: U \rightarrow [0,1],$$

где U – универсальное множество, которое интерпретируется как множество значений концентраций каждого загрязнителя, а значение функции принадлежности $\mu_A(x)$ показывает степень принадлежности элемента x – значения концентрации какого-то ЗВ – нечеткому множеству A .

Применение формулы (2) для агрегирования информации о степени загрязнения территории городских поселений на основе нечетких сведений о концентрациях ЗВ может быть не вполне эффективно, ввиду того, что в этом случае задача будет заключаться в сравнение нечетких чисел, которые, в свою очередь, построены на основе экспертной и в какой-то степени неточной информации, поэтому не могут служить в полной мере объективными оценками. С другой стороны, этот метод определения агрегированной оценки (2) не учитывает значения концентраций других загрязнителей, оценка производится только по критическому показателю, и является чувствительным к его изменению. Поэтому предлагается метод агрегирования исходной информации, основанный на построении распределенной оценки

каждой концентрации ЗВ классу загрязнения, и дальнейшей обработке таких сведений при рассмотрении всех выбранных ЗВ.

В статье для представления прогнозируемого значения концентрации ЗВ выбрана треугольная функция принадлежности. В качестве функции принадлежности может быть выбрана произвольная функция. Основное ограничение, характерное для задач обеспечения экологической безопасности города: функция должна быть полунепрерывной сверху. На рисунке изображена треугольная функция принадлежности прогнозируемого значения концентрации C_p ЗВ и указаны разделяющие интервалы AQI пороговые (контрольные) значения $x_1, \dots, x_6$.

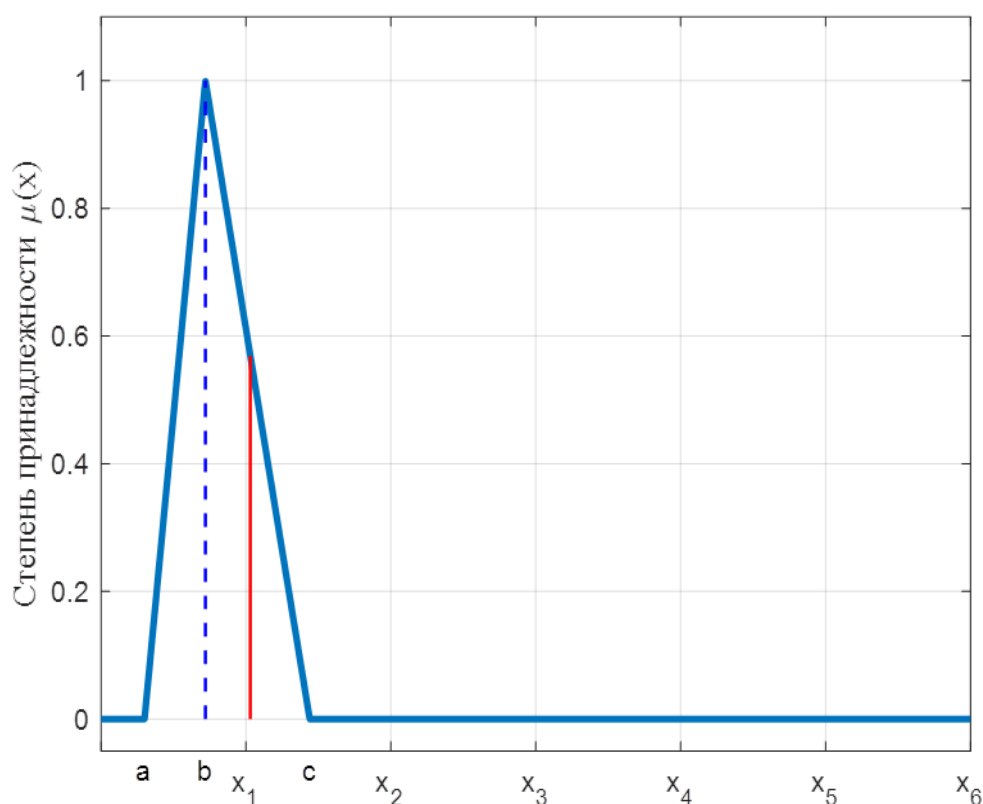


Рис. График треугольной функции принадлежности нечеткого значения концентрации C_p , $x_1, \dots, x_6$ – пороговые значения (иллюстрация автора)

Fig. Graph of the triangular membership function of the fuzzy value concentration C_p , $x_1, \dots, x_6$ – threshold values (illustration by author)

Экологическая информация характеризуется тем, что неопределенность отнесения значения концентрации C_p какого-то ЗВ к определенному классу возникает только между двумя соседними интервалами шкалы AQI . В нашем случае это положение можно сформулировать в виде

Предположения 1. Носитель любой функции принадлежности нечеткого множества может принадлежать не более, чем двум соседним отрезкам шкалы.

Будем считать в дальнейшем, что множество проектов создаваемого объекта или вариантов

управления действующим образуют множество $X = \{1, 2, \dots, n\}$. Каждый элемент этого множества характеризуется прогнозируемыми значениями концентраций ЗВ, то есть оценивается по перечисленным выше $K = 6$ показателям. Заметим, в условиях недостаточности информации число критериев оценки – число загрязнителей – может быть меньше 6 ($K < 6$).

На основании **Предположения 1**, для оценки прогнозируемого значения степени принадлежности концентрации ЗВ, характеризующего конкретный объект $i \in X$, определенному классу AQI ,

с номером $j \in \{1, 2, \dots, m\}$, введем $x_0 = 0$ и определим следующие показатели:

$$S = \int_a^c \mu(x) dx, \quad S_j = \int_{x_{j-1}}^{x_j} \mu(x) dx, \quad j = \overline{1, m}. \quad (3)$$

Степень принадлежности объекта с номером $i \in X$ к градации j , при рассмотрении какого-то фиксированного ЗВ p , вычисляется как:

$$a_{jp}(i) = S_j / S. \quad (4)$$

Для построенных по формулам (3)–(4) оценок верна.

Лемма 1. Оценки $a_{jp}(i)$ являются распределенными, и для $\forall i \in X$, и рассматриваемого ЗВ p выполняется:

$$\sum_{j=1}^m a_{jp}(i) = 1. \quad (5)$$

Таким образом, каждый объект $i \in X$ характеризуется матрицей $(a_{jp}(i))$, столбцы которой представляют распределенные оценки ЗВ p по шкале $E = \{e_1, \dots, e_m\}$ – AQL.

Для агрегирования исходной информации примем естественное *Предположение 2*. Градации шкалы AQL – $E = \{e_1, \dots, e_m\}$ линейно упорядочены – подчинены условию:

$$e_1 > e_2 > \dots > e_m, \quad (6)$$

где знак « $>$ » означает «лучше, чем».

Вычислим агрегированную оценку рассмотренных концентраций ЗВ по шкале $E = \{e_1, \dots, e_m\}$ как:

$$p_j(i) = \frac{\sum_{p=1}^K a_{jp}(i)}{K}, \quad i \in X, j \in \overline{1, m}. \quad (7)$$

Тогда представим оценку произвольного объекта $a \in X$ по принятой порядковой шкале, определенную на основании вычислений (3), (4), (7), сделав соответствующие переобозначения, как:

$$\gamma_a = \{p_1^a, p_2^a, \dots, p_m^a\}. \quad (8)$$

Лемма 2. Построенная на основании *Предположения 2* и вычислений (3), (4), (7) оценка γ_a – (8) – является распределенной и значения p_j^a подчиняются условию:

$$\sum_{j=1}^m p_j^a = 1. \quad (9)$$

Если ввести численные значения «ценности» каждой градации, то условие их линейной упорядоченности (6) будет представлено как:

$$\alpha_1 > \alpha_2 > \dots > \alpha_m, \quad \alpha_j \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, m. \quad (10)$$

Таким образом, исходная задача (8)–(10) сведена к многокритериальной задаче [18–20]. Будем считать, что «ценность» каждого объекта вычисляется при использовании аддитивной свертки как:

$$U_a = \alpha_1 \cdot p_1^a + \dots + \alpha_m \cdot p_m^a. \quad (11)$$

Для решения задачи упорядочения объектов (8)–(11) на основе многокритериальных оценок во многих работах предлагается предварительно вычислить значения коэффициентов

$\alpha_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, m$ [18–20]. Специфика задач обеспечения экологической безопасности урбанизированной территории делает затруднительным получение достоверной информации на основе попарных сравнений [18–20] или унарных оценок ЗВ [21] по степени влияния на организм человека. В дальнейшем знание численных значений $\alpha_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, m$ не является необходимым, достаточно выполнения ограничения (10). Для решения задачи в такой постановке на предварительном этапе используется метод *Jacquet-Lagrezze E.* [22], который заключается в минимизации модуля различия по ценности оценок (8) и $\gamma_b = \{p_1^b, p_2^b, \dots, p_m^b\}$ для каждой пары альтернатив $a, b \in X, a \neq b$:

$$|U_a - U_b| \rightarrow \min. \quad (12)$$

Задача (9)–(12) записывается как [22]:

$$\sum_{s=1}^m \sum_{l=1}^m \tau_{sl} \cdot |\alpha_s - \alpha_l| \rightarrow \min, \quad (13)$$

$$\sum_{l=1}^m \tau_{sl} = p_s^a, \quad \sum_{s=1}^m \tau_{sl} = p_l^b, \quad \tau_{sl} \geq 0, \quad s, l = \overline{1, m}, \quad (14)$$

$$\tau_{ss} = \min(p_s^a, p_s^b), \quad s = \overline{1, m}. \quad (15)$$

Для решения задачи (13)–(15) используется эффективный метод [22]. Там же доказано, что решение задачи (10), (13)–(15):

$$\tau^* = (\tau_{sl}^*)_{m \times m}. \quad (16)$$

обладает свойством оценки превосходства a над b – R_{ab} , b над a – R_{ba} , эквивалентности – $R_{a \sim b}$, вычисляемые на основе (16) как:

$$R_{a \sim b} = \sum_{s=1}^m \tau_{ss}^*, \quad R_{ab} = \sum_{s < l} \tau_{sl}^*, \quad R_{ba} = \sum_{s > l} \tau_{sl}^*, \quad (17)$$

не зависят от подчиняющихся ограничению (10) численных значений α_j . Этот результат – (17) – дал возможность вычислить матрицу предпочтений исследуемых альтернатив:

$$\mu = (\mu_{ab})_{n \times n} \quad (18)$$

как

$$\mu_{ab} = R_{ab} + R_{a \sim b} / 2, \quad a, b \in X, a \neq b, \mu_{aa} = 1. \quad (19)$$

Вычисленное нечеткое бинарное отношение μ является обратимым, то есть $\mu_{ab} + \mu_{ba} = 1, \forall a, b \in X = \{1, 2, \dots, n\}$.

Нечеткое отношение μ – (18), (19) – в общем случае нетранзитивное и не может быть использовано для окончательного ранжирования альтернатив. Поэтому оно аппроксимируется максимально близким к нему транзитивным отношением – нечеткой обратимой квазисерией – матрицей $T = (t_{ij})$, каждый элемент которой показывает, насколько объект i лучше объекта j [23, 24].

Результаты и обсуждение

Для иллюстрации разработанного подхода сделаем предположение о том, что рассматриваемые альтернативы не будут оказывать вредного влияния на здоровье жителей урбанизированной территории. В этом случае шкала состоит из трех градаций $E = \{e_1, e_2, e_3\}$. Рассмот-



рим множество альтернативных вариантов, состоящее из шести объектов, то есть $X = \{1, 2, \dots, 6\}$. Фрагмент исходной информации – оценка первого объекта – приведен в таблице 2.

Для других объектов структура соответствующих таблиц идентична таблице 2.

Таблица 2

Оценка 1 альтернативы

Table 2

Evaluation of Alternative 1

№ п/п	шкала E	3В	PM2.5	PM10	NO ₂	SO ₂	CO	O ₃
			1	2	3	4	5	6
1.	e_1		0,8	0,9	0	0,5	1	1
2.	e_2		0,2	0,1	0,1	0,5	0	0
3.	e_3		0	0	0,9	0	0	0

Согласно формуле (7), соответствующая распределенная оценка 1 альтернативы вычислена как $\gamma_1 = (0,7; 0,15; 0,15)$. Аналогично вычисля-

ются распределенные оценки других, принадлежащих множеству X , объектов, информация о которых представлена в таблице 3, в виде столбцов.

Таблица 3

Агрегированные оценки объектов $X = \{1, 2, \dots, 6\}$

Table 3

Aggregated Object Estimations $X = \{1, 2, \dots, 6\}$

№ п/п	шка- ла E	j	1	2	3	4	5	6
			1	2	3	4	5	6
1.	e_1		0,7	0,6	0,4	0,8	0	0,8
2.	e_2		0,15	0,4	0,6	0,1	0,7	0,1
3.	e_3		0,15	0	0	0,1	0,3	0,1

На основании приведенной в таблице 3 информации вычислена матрица предпочтений объектов A [22]:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0,475 & 0,575 & 0,45 & 0,85 & 0,45 \\ 0,525 & 1 & 0,6 & 0,45 & 0,8 & 0,45 \\ 0,425 & 0,4 & 1 & 0,35 & 0,7 & 0,35 \\ 0,55 & 0,55 & 0,65 & 1 & 0,9 & 0,5 \\ 0,15 & 0,2 & 0,3 & 0,1 & 1 & 0,1 \\ 0,65 & 0,55 & 0,65 & 0,5 & 0,9 & 1 \end{pmatrix}.$$

Для полученной матрицы A вычислена матрица ее транзитивного замыкания A^* [23, 24]:

$$A^* = \begin{pmatrix} 1 & 0,475 & 0,575 & 0,45 & 0,85 & 0,45 \\ 0,525 & 1 & 0,6 & 0,45 & 0,8 & 0,45 \\ 0,425 & 0,425 & 1 & 0,425 & 0,7 & 0,425 \\ 0,55 & 0,55 & 0,65 & 1 & 0,9 & 0,5 \\ 0,3 & 0,3 & 0,3 & 0,3 & 1 & 0,3 \\ 0,55 & 0,55 & 0,65 & 0,5 & 0,9 & 1 \end{pmatrix}.$$

На основании матрицы A^* вычисляется нечеткая обратимая квазисерия – матрица T [22, 23]:

$$T = \begin{pmatrix} 1 & 0,375 & 0,675 & 0,35 & 0,8 & 0,35 \\ 0,625 & 1 & 0,675 & 0,35 & 0,8 & 0,35 \\ 0,325 & 0,325 & 1 & 0,325 & 0,8 & 0,325 \\ 0,65 & 0,65 & 0,675 & 1 & 0,8 & 0,5 \\ 0,2 & 0,2 & 0,2 & 0,2 & 1 & 0,2 \\ 0,65 & 0,65 & 0,675 & 0,5 & 0,8 & 1 \end{pmatrix}.$$

Элементы матрицы T позволяют упорядочить исходное множество объектов как $\{4, 6\} >$

$2 > 1 > 3 > 5$, вычисленное значение $\lambda = 0,1$ показывает высокую согласованность исходной информации. Таким образом, эквивалентные объекты 4 и 6 предпочтительнее, чем 2 с мерой 0,675, 2 – лучше, чем 1 с оценкой 0,625, который более предпочтителен, чем 3 с показателем 0,675, и 3 – лучше 5 как 0,8. Другие оценки предпочтительности элементов для любой пары альтернатив находятся в матрице T .

Закключение

Применение разработанного подхода к ранжированию альтернативных вариантов реализации программ развития города на раннем этапе их исследования даст возможность учесть неопределенность исходных данных. Специфика нечетких оценок альтернатив позволила построить модель обработки информации, для анализа которой был предложен метод поддержки принятия решений- агрегирование исходной информации и вычисление весов объектов. Приведенный пример является иллюстрацией реализации разработанной методики решения практических задач. Предложенный метод поддержки принятия решений может быть полезен в качестве специального аппарата для ранжирования объектов на ранней стадии их анализа по степени влияния на экологию атмосферы городской территории.

Список литературы

1. Xu W. The influence of PM2.5 exposure on kidney diseases/ W. Xu, S. Wang, L. Jiang X. Sun, N. Wang, X. Liu, et al. // Human & Experimental Toxicology. – 2022. – Vol. 41. – DOI: 10.1177/096032712111069982.



2. Chowdhury S. Global health burden of ambient PM_{2.5} and the contribution of anthropogenic black carbon and organic aerosols / S. Chowdhury, A. Pozzer, A. Haines, K. Klingmüller, T. Münzel, P. Paasonen, et al. // *Environment International*. – 2022. – Vol. 159. – DOI: 10.1016/j.envint.2021.107020.
3. Xi Y. Effects of short-term ambient PM_{2.5} exposure on cardiovascular disease incidence and mortality among U. S. hemodialysis patients: a retrospective cohort study / Y. Xi, D. B. Richardson, A. V. Kshirsagar, T. J. Wade, J. E. Flythe, E. A. Whitsel // *Environmental Health*. – 2022. – Vol. 21, issue 1. – DOI: 10.1186/s12940-022-00836-0.
4. Perry S. G. Characterization of pollutant dispersion near elongated buildings based on wind tunnel simulations / S. G. Perry, D. K. Heist, L. H. Brouwer, E. M. Monbureau, L. A. Brixey // *Atmospheric Environment*. – 2016. – Vol. 142. – P. 286–295. – DOI: 10.1016/j.atmosenv.2016.07.052.
5. Zaitseva N. V. 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 // *Health Risk Analysis*. – 2024. – № 4. – P. 14–26. – DOI: 10.21668/health.risk/2024.4.02.eng.
6. Zhizhin N. N., D'yakov M. S., Khodyashev M. B. Analysis of tools aimed at managing ambient air quality in Perm city / N. N. Zhizhin, M. S. D'yakov, M. B. Khodyashev // *Health Risk Analysis*. – 2019. – № 4. – P. 50–59. – DOI: 10.21668/health.risk/2019.4.05.eng.
7. Zaitseva N. V. Methodical approaches to assessing categories of occupational risk predetermined by various health disorders among workers related to occupational and labor process factors / N. V. Zaitseva, P. Z. Shur, V. B. Alekseev, A. A. Savochkina, A. I. Savochkin, E. V. Khrushcheva // *Health Risk Analysis*. – 2020. – № 4. – P. 23–30. – DOI: 10.21668/health.risk/2020.4.03.eng.
8. Zaitseva N. V. Emergence and variability of influence exerted by weather and climatic factors on life expectancy in the Russian Federation taking into account differentiation of regions as per socioeconomic and sanitary-epidemiologic determinants / N. V. Zaitseva, S. V. Kleyn, D. A. Kiryanov, M. V. Glukhikh, M. R. Kamaltdinov // *Health Risk Analysis*. – 2020. – № 4. – P. 63–76. – DOI: 10.21668/health.risk/2020.4.07.eng.
9. Марчук Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды / Г. И. Марчук. – М.: Наука, 1982. – 320 с.
10. Белолипецкий В. М. Математическое моделирование в задачах охраны окружающей среды / В. М. Белолипецкий, Ю. И. Шокин. – Новосибирск: Инфолио-пресс, 1997. – 240 с.
11. Российская Федерация. Об утверждении методов расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе: Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации № 273 от 06.06.2017 // *КонтурЭкстерн*. – Режим доступа: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=310516> (дата обращения: 23.05.2026), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
12. РД 52.04.667-2005. Документы о состоянии загрязнения атмосферы в городах для информирования государственных органов, общественности и населения. Общие требования к разработке, построению, изложению и содержанию // Кодекс. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200067118/> (дата обращения 23.05.2026), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
13. Technical Assistance Document for the Reporting of Daily Air Quality // *AirNow*. – Режим доступа: <https://www.airnow.gov/publications/air-quality-index/technical-assistance-document-for-reporting-the-daily-aqi/> (дата обращения 23.05.2026), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ.
14. Communicating Air Quality Conditions: The Air Quality Index // EPA. – Режим доступа: <https://www.epa.gov/wildfire-smoke-course/communicating-air-quality-conditions-air-quality-index/> (дата обращения 23.05.2026), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ.
15. Прошунина К. А. Модель информационного взаимодействия участников системы организации благоустройства территорий / К. А. Прошунина, Т. В. Хоменко // *Инженерно-строительный вестник Прикаспия*. – 2026. – № 1 (55). – С. 112–119. – DOI 10.52684/2312-3702-2026-55-1-112-119.
16. Zadeh L. A. The Linguistic Approach and its Application to Decision Analysis / L. A. Zadeh. – N. Y.: Plenum Press. 1976. – P. 335–361.
17. Zadeh L. A. Similarity relations and fuzzy orderings / L. A. Zadeh // *Inf. Sci.* – 1971. – Vol. 3, no. 2, – P. 177–200.
18. Saaty T. L. Models, Methods, Concepts and Applications of the Analytic Hierarchy Process / T. L. Saaty, G. Vargas. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2000. 345 p.
19. Saaty T. L. Decision Making with the Analytic Network Process: Economic / T. L. Saaty, G. Vargas // *Political, Social and Technological Applications with Benefits, Opportunities, Costs and Risks*. – New York: Springer, 2006. – 278 p.
20. Saaty T. L. Theory and Applications of the Analytic Network Process: Decision Making With Benefits, Opportunities, Costs, and Risks / T. L. Saaty. – Pittsburgh: RWS Publications, 2013. – 492 p.
21. Санжапов Б. Х. Унарные экспертные оценки в иерархических системах / Б. Х. Санжапов // *Инженерно-строительный вестник Прикаспия*. – 2025. – № 1 (51). – С. 111–115. – DOI 10.52684/2312-3702-2025-51-1-111-115.
22. Jacquet-Lagrange E. Modelling Preferences among Distributions using Fuzzy Relations / E. Jacquet-Lagrange // *The Fifth Research Conference on Subjective Probability, Utility and Decision Making* (Sept. 1–4. 1975). – Darmstadt, 1975. – P. 1–4.
23. Макеев С. П. Ранжирование распределенных величин на основе нечетких квазисерий / С. П. Макеев, Г. П. Серов, С. И. Чуйкин, И. Ф. Шахнов. – М.: ВЦ АН СССР, 1986. – 34 с.
24. Sanzhapov B. Kh. Decision support based on the interval relation / B. Kh. Sanzhapov, R. B. Sanzhapov // *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. – 2017. – Vol. 12, № 15. – P. 4601–4607.

References

1. Xu W., Wang S., Jiang L., Sun X., Wang N., Liu X., et al. The influence of PM_{2.5} exposure on kidney diseases. *Human & Experimental Toxicology*, 2022, vol. 41. DOI 10.1177/09603271211069982.

2. Chowdhury S., Pozzer A., Haines A., Klingmüller K., Münzel T., Paasonen P., et al. Global health burden of ambient PM_{2.5} and the contribution of anthropogenic black carbon and organic aerosols. *Environment International*. 2022, vol. 159. DOI 10.1016/j.envint.2021.107020.
3. Xi Y., Richardson D. B., Kshirsagar A. V., Wade T. J., Flythe J. E., Whitsel E. A. Effects of short-term ambient PM_{2.5} exposure on cardiovascular disease incidence and mortality among U.S. hemodialysis patients: a retrospective cohort study. *Environmental Health*, 20226, vol. 21, issue 1. DOI 10.1186/s12940-022-00836-0.
4. Perry S. G., Heist D. K., Brouwer L. H., Monbureau E. M., Brixey L. A. Characterization of pollutant dispersion near elongated buildings based on wind tunnel simulations. *Atmospheric Environment*, 2016, vol. 142, pp. 286–295. DOI 10.1016/j.atmosenv.2016.07.052.
5. 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.
6. Zhizhin N. N., D'yakov M. S., Khodyashev M. B. Analysis of tools aimed at managing ambient air quality in Perm city. *Health Risk Analysis*, 2019, no. 4, pp. 50–59. DOI 10.21668/health.risk/2019.4.05.eng.
7. Zaitseva N. V., Shur P. Z., Alekseev V. B., Savochkina A. A., Savochkin A. I., Khrushcheva E. V. Methodical approaches to assessing categories of occupational risk predetermined by various health disorders among workers related to occupational and labor process factors. *Health Risk Analysis*, 2020, no. 4, pp. 23–30. DOI: 10.21668/health.risk/2020.4.03.eng.
8. Zaitseva N.V., Kleyn S.V., Kiryanov D.A., Glukhikh M.V., Kamaltdinov M.R. Emergence and variability of influence exerted by weather and climatic factors on life expectancy in the Russian Federation taking into account differentiation of regions as per socioeconomic and sanitary-epidemiologic determinants. *Health Risk Analysis*, 2020, no. 4, pp. 63–76. DOI 10.21668/health.risk/2020.4.07.eng.
9. Marchuk G. I. *Matematicheskoye modelirovaniye v probleme okruzhayuchey sredy* [Mathematical Modeling in Environmental Problems]. Moscow : Nauka; 1982, 320p.
10. Belolipetskii V. M., Shokin Yu. I. *Matematicheskoye modelirovaniye v zadachakh okhrani okruzhayushchei sredy* [Mathematical modeling in environmental protection problems]. Novosibirsk : Infolio-press; 1997, 240 p.
11. Rossiyskaya Federatsiya. Ob utverzhdenii metodov raschetov rasseivaniya vibrosoy vrednikh (zagryaznyayushchikh) veshchestv v atmosfornom vozdukh : Prikaz Ministerstva prirodnikh resursov i ekologii Rossiiskoi Federatsii № 273 ot 06.06.2017. [Russian Federation. On Approval of Methods for Calculating the Dispersion of Emissions of Harmful (Polluting) Substances in Atmospheric Air Order of the Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation no. 273 dated June 6, 2017]. *KonturEkstern* [ConturEkstern]. Available at: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=310516>.
12. RD 52.04.667-2005. Dokumenti o sostoyanii zagryazneniya atmosfery v gorodakh dlya informirovaniya gosudarstvennykh organov, obshchestvennosti i naseleniya. Obshchie trebovaniya k razrabotke, postroyeniyu, izlozheniyu i soderzhaniyu. [RD 52.04.667-2005 Documents on the state of atmospheric pollution in cities for informing government agencies, the public and the population. General requirements for the design, construction, presentation and content]. *Kodeks* [Code]. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200067118/>.
13. Technical Assistance Document for the Reporting of Daily Air Quality. *AirNow*. Available at: <https://www.airnow.gov/publications/air-quality-index/technical-assistance-document-for-reporting-the-daily-aqi/>.
14. Communicating Air Quality Conditions: The Air Quality Index. *EPA*. Available at: <https://www.epa.gov/wildfire-smoke-course/communicating-air-quality-conditions-air-quality-index/>.
15. Proshunina K. A., Khomenko T. V. Model informatsionnogo vzaimodeistviya uchastnikov sistemi organizatsii blagoustroystva territorii [A model of information interaction between participants in the system of organizing landscaping]. *Inzhenerno-stroitel'nyy vestnik Prikaspiya* [Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region]. 2026, no. 1 (55), pp. 112–119. DOI 10.52684/2312-3702-2026-55-1-112-119.
16. Zadeh L. A. *The Linguistic Approach and its Application to Decision Analysis*. N. Y. : Plenum Press; 76, pp. 335–361.
17. Zadeh L. A. Similarity relations and fuzzy orderings. *Inf. Sci.* 1971, vol. 3, no. 2, pp. 177–200.
18. Saaty T. L., Vargas G. *Models, Methods, Concepts and Applications of the Analytic Hierarchy Process*. Boston : Kluwer Academic Publishers; 2000, 345 p.
19. Saaty T. L., Vargas G. *Decision Making with the Analytic Network Process: Economic, Political, Social and Technological Applications with Benefits, Opportunities, Costs and Risks*. New York : Springer; 2006, 278 p.
20. Saaty T. L. *Theory and Applications of the Analytic Network Process: Decision Making With Benefits, Opportunities, Costs, and Risks*. Pittsburgh : RWS Publications; 2013, 492 p.
21. Sanzhapov B. Kh. Unarnie ekspertnie otsenki v ierarkhicheskikh sistemakh [Unary expert evaluations in hierarchical systems]. *Inzhenerno-stroitel'nyy vestnik Prikaspiya* [Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region]. 2025, no. 1 (51), pp. 111–115. DOI 10.52684/2312-3702-2025-51-1-111-115.
22. Jacquet-Lagrez E. *Modelling Preferences among Distributions using Fuzzy Relations. The Fifth Research Conference on Subjective Probability, Utility and Decision Making (Sept. 1–4. 1975)*. Darmstadt; 1975, pp.1–4.
23. Makeev S. P., Serov G. P., Chuikin S. I., Shakhnov I. F. *Ranzhirovaniye raspredelennikh velichin na osnove nechetkikh kvaziserii* [Ranking of distributed quantities based on fuzzy quasi-series]. Moscow : VTs AN SSSR; 1986, 34 p.
24. Sanzhapov B. Kh., Sanzhapov R. B. Decision support based on the interval relation. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2017, vol. 12, no 15, pp. 4601–4607.

© Б. Х. Санжапов

Ссылка для цитирования:

Санжапов Б. Х. Распределенные нечеткие оценки в ранжировании влияющих на экологическую безопасность атмосферы урбанизированной территории объектов // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГБОУ АО ВО «АГАСУ», 2026. № 3 (57). С. 75–81.