

УДК 504.064, 504.75.06

А. В. Игнатьев, М. А. Куликов

Волгоградский государственный технический университет

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО БЛАГОПОЛУЧИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ ТЕРРИТОРИЙ: ПОДХОД К УЛУЧШЕНИЮ МОНИТОРИНГА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУХА

**Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-11-20024,
<https://rscf.ru/project/22-11-20024/> и Волгоградской области**

Предложена методика категоризации городских территорий, нацеленная на определение оптимального расположения и количества контрольных точек анализа загрязнения воздуха. Методика основана на комплексной многокритериальной оценке с применением модифицированного вербального анализа решений ОРКЛАСС, что позволяет осуществлять ранжирование и категоризацию территорий по уровню экологического благополучия. Результаты такой категоризации могут эффективно использоваться для выявления наилучших мест установки новых постов наблюдения за концентрацией загрязняющих веществ. Это, в свою очередь, способствует повышению достоверности оценки состояния атмосферного воздуха и улучшает управление экологической ситуацией в городах.

Ключевые слова: атмосферный воздух, выбросы, загрязняющие вещества, посты мониторинга загрязнения воздуха, методика категоризации городских территорий.

Введение

В условиях ухудшения качества атмосферного воздуха в крупных городах становится особенно актуальным обеспечение эффективного мониторинга загрязнения. Правила организации наблюдений и контроля загрязнения воздуха в населенных пунктах регламентируются государственным стандартом ГОСТ 17.2.3.01—86 и руководством по контролю загрязнения атмосферы РД 52.04.189—91¹. Согласно этим документам, для постоянного наблюдения за концентрацией загрязняющих веществ (ЗВ) используются стационарные посты, количество которых определяется на основе таких факторов, как численность населения, площадь города, рельеф местности, расположение промышленных объектов и зон отдыха.

По установленным нормативам количество стационарных постов наблюдения варьируется от 1 для городов с населением до 50 тыс. чел. до 10...20 постов для мегаполисов с населением свыше 1 млн чел. Однако практика показывает, что плотность существующей сети таких постов часто оказывается недостаточной для обеспечения полноценного контроля. Например, в г. Волгограде, где население превышает 1 млн чел., на данный момент функционирует всего 6 стационарных наблюдений, в то время как, согласно нормативам, необходимо 10...20 постов. Фактический уровень обеспечения мониторинга загрязнения атмосферы в крупных городах зачастую составляет лишь 41 % от необходимых объемов.

¹ ГОСТ 17.2.3.01—86. Охрана природы. Атмосфера. Правила контроля качества воздуха населенных пунктов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200012789>.

РД 52.04.189—91. Руководством по контролю загрязнения атмосферы. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200036406>.

Таким образом, оптимизация расположения новых постов наблюдения за загрязнением воздуха становится критически важной задачей для эффективного управления качеством воздушной среды, особенно в условиях ограниченного финансирования. Актуальность этой проблемы требует применения инновационных подходов и методик, которые позволят не только улучшить качество мониторинга, но и распределить ресурсы наилучшим образом, ориентируясь на экологическое состояние разных территорий. В данной статье предлагается методика категоризации городских территорий, которая позволит рационально и обоснованно определить места установки новых стационарных постов наблюдения, основываясь на многокритериальном анализе уровня экологического благополучия.

Метод категоризации городских территорий по степени их экологического благополучия

В основе предлагаемой методики категоризации городских территорий лежит комплексная многокритериальная оценка их экологического состояния. Такой подход выбран по следующим причинам:

1. Экологическое состояние городских территорий определяется широким спектром параметров — загрязнение атмосферного воздуха, водных объектов, почв, уровни шумового и других видов физического воздействия. Оценка по единичным показателям не может дать объективной и всесторонней картины.

2. Критерии, характеризующие экологическое благополучие территорий, могут иметь разную размерность и шкалы измерения. Необходим инструмент, позволяющий свести их к сопоставимому виду и рассчитать интегральную оценку.

3. Экологическое состояние городских территорий имеет ярко выраженный пространственный аспект. Важно учитывать не только абсолютные значения показателей, но и их дифференциацию в пределах города.

4. Процесс категоризации городских территорий по степени экологического благополучия носит многокритериальный характер и предполагает упорядочение альтернатив (городских районов) в соответствии с предпочтениями лица, принимающего решение (ЛПР).

Существует широкий спектр методов принятия многокритериальных решений [1—8], который активно применяется для решения сложных экологических задач [9—16]. Однако большинство из них предназначены лишь для выбора наилучшей альтернативы, а не для полной классификации многокритериальных объектов.

Для решения задачи классификации целесообразно использовать методы вербального анализа решений (ВАР) [17—24], обладающие рядом преимуществ: психологическая обоснованность процедур получения информации от ЛПР; математическая строгость преобразований; учет особенностей поведения человека при принятии решений; возможность поэтапной разработки решающего правила.

В качестве основы для разработки метода классификации городских территорий по степени благоустройства применяется модифицированный метод ВАР — ОРКЛАСС (ОРдинальная КЛАССификация) [20, 21]. Его ключевая задача — построение решающего правила для отнесения любой альтернативы к одному из упорядоченных классов, с учетом всех возможных комбинаций оценок по критериям, в т. ч. вербальных.

Таким образом, решение задачи полной порядковой классификации предполагает построение функции, отображающей пространство критериев во множество классов.

Предлагаемый метод основан на комплексной оценке ряда ключевых экологических показателей. Он предполагает разделение всех городских территорий на заранее определенное количество категорий, характеризующих различные уровни экологического благополучия.

Ключевые этапы метода:

1. Определение множества классов (категорий) $C = \{C_1, C_2, \dots, C_M\}$, к которым может быть отнесена территория в зависимости от уровня экологического благополучия.

2. Определение системы критериев $K = \{K_1, K_2, \dots, K_N\}$ для оценки экологического состояния городских территорий. Эти критерии должны всесторонне характеризовать уровень загрязнения воздуха, воды, почв, шумового загрязнения и других экологических параметров.

3. Сбор и систематизация данных по выбранным критериям для каждой городской территории (района, микрорайона и т. п.). Источниками данных могут быть результаты экологического мониторинга, СР загрязнения атмосферы, статистические данные и т. д.

4. Разработка шкал измерения (множества оценок) критериев и приведение их к сопоставимому виду (нормализация).

Для каждого из критериев K_q множество оценок $X_q = \{x_q^k\}$ упорядочивается в лексиграфическом порядке:

$$|X_q| = S_q, \quad (1)$$

где S_q — число значений оценок на шкале q -го критерия.

Разработка шкал измерения критериев и их нормализация является важным этапом предлагаемого метода категоризации городских территорий по степени экологического благополучия.

Поскольку набор критериев, характеризующих экологическое состояние городских территорий, может быть весьма разнородным, необходимо разработать соответствующие шкалы измерения для каждого из них. Эти шкалы должны обеспечивать сопоставимость и возможность последующей свертки частных критериев в интегральную оценку. Выбор шкалы измерения зависит от природы рассматриваемого критерия:

- для количественных показателей (концентрации загрязняющих веществ, уровни шума и т. п.) могут применяться численные шкалы;
- для качественных характеристик (степень благоустройства, наличие зеленых насаждений и т. д.) целесообразно использовать порядковые шкалы с вербальными градациями.

При этом важно, чтобы все шкалы были ориентированы в одном направлении — от «наихудшего» к «наилучшему» состоянию. Это необходимо для корректного агрегирования частных критериев.

После разработки шкал измерения необходимо провести нормализацию критериев, т. е. привести их к сопоставимому виду. Это достигается путем

преобразования исходных значений в безразмерные относительные показатели, изменяющиеся в интервале (0; 1). Для количественных критериев нормализация может выполняться по формуле:

$$x_{\text{norm}} = \frac{x - x_{\text{min}}}{x_{\text{max}} - x_{\text{min}}}, \quad (2)$$

где x_{norm} — нормализованное значение критерия; x — исходное значение; $x_{\text{min}}, x_{\text{max}}$ — минимальное и максимальное значения критерия в рассматриваемой совокупности.

Для качественных, порядковых критериев нормализация осуществляется путем сопоставления их вербальных градаций с численной шкалой (0; 1) в соответствии с ранжированием от «наихудшего» к «наилучшему» состоянию.

Таким образом, в результате нормализации все частные критерии, характеризующие экологическое состояние городских территорий, приводятся к сопоставимому безразмерному виду. Это является необходимым условием для их дальнейшей свертки в интегральную оценку и последующей категоризации.

5. Определение весовых коэффициентов критериев $w_i, i = 1, \dots, N$, отражающих их относительную значимость.

Для определения весовых коэффициентов критериев, отражающих их относительную значимость при оценке экологического состояния городских территорий, можно использовать метод экспертных оценок (МЭО) [24], или метод анализа иерархий (МАИ), разработанный Т. Саати [5, 7],

МЭО имеет ряд преимуществ перед МАИ при определении весовых коэффициентов критериев для оценки экологического состояния городских территорий:

- учет мнений специалистов-экспертов. МЭО позволяет непосредственно задействовать компетентных специалистов в области охраны окружающей среды и городской экологии. Их профессиональные знания и опыт являются ценным источником информации об относительной важности различных экологических критериев.

В отличие от этого, МАИ в большей степени ориентирован на формализованные математические процедуры парных сравнений, что может отрываться от содержательной сути оцениваемых показателей;

- гибкость процедур получения экспертных оценок. При использовании МЭО можно применять различные методики сбора и обработки суждений экспертов — прямое ранжирование, парные сравнения, балльные оценки и др. Это дает возможность адаптировать процедуру к особенностям конкретной задачи.

МАИ же изначально предполагает строгую процедуру парных сравнений, что может быть менее удобным для экспертов при оценке большого числа критериев;

- возможность учета согласованности экспертных мнений. При использовании МЭО можно проводить анализ согласованности мнений экспертной группы и при необходимости корректировать оценки для повышения их согласованности.

В МАИ также реализован механизм проверки согласованности суждений, но он встроен в саму процедуру вычислений и не дает возможности гибкого управления этим процессом;

- меньшая трудоемкость. Применение МЭО, как правило, требует меньших временных и ресурсных затрат по сравнению с МАИ. Это особенно актуально при оценке большого числа критериев, характеризующих экологическое состояние городских территорий.

Таким образом, использование МЭО позволяет эффективнее учитывать мнения профессионалов-экологов, адаптировать процедуру оценивания к специфике задачи и при этом обеспечивать требуемый уровень обоснованности получаемых весовых коэффициентов критериев.

6. Создание разрешающего правила для отнесения любой альтернативы (городской территории) к одному из упорядоченных классов решений (категории, характеризующей уровень экологического благополучия). Опишем процедуру создания разрешающего правила более подробно.

6.1. Определяется множество всех гипотетически возможных состояний городских территорий (альтернатив), подлежащих категоризации, которое является декартовым произведением нормированных шкал критериев:

$$Y = X_1 \times X_2 \times \dots \times X_N.$$

Согласно этому каждая альтернатива описывается набором оценок по каждому из критериев K_1, K_2, \dots, K_N и может быть представлена в виде кортежа:

$$y_j = \langle y_{j,1}, y_{j,2}, \dots, y_{j,N} \rangle, \text{ где } y_{j,q} \in X_q, j = 1, \dots, S \text{ и } S = |Y| = \prod_{q=1}^N S_q. \quad (3)$$

6.2. На основании предпочтений эксперта строится разбиение множества Y на M непересекающихся подмножеств (заранее определенных классов, к которым может быть отнесена территория):

$$Y = Y_1 \cup Y_2 \cup \dots \cup Y_M; Y_i \cap Y_j = \emptyset \text{ при } i \neq j. \quad (4)$$

Процедура разбиения множества альтернатив на классы может быть описана как последовательность нижеследующих операций.

6.2.1. Выбираются альтернатива $y_1 = \langle y_{1,1}, y_{1,2}, \dots, y_{1,N} \rangle \in C_1$ с наилучшим сочетанием оценок и альтернатива $y_s = \langle y_{s,1}, y_{s,2}, \dots, y_{s,N} \rangle \in C_M$ с наихудшим сочетанием оценок. Эти альтернативы являются центрами наилучшего класса C_1 и наихудшего класса C_M .

6.2.2. Также определяются эталонные альтернативы для каждого класса.

6.2.3. Для всех альтернатив вычисляются их взвешенные суммы:

$$\text{sum}(y_i) = \sum_{j=1}^N w_j y_{i,j}, \quad i = 1, \dots, S. \quad (5)$$

6.2.4. Альтернативы располагаются между эталонами по возрастанию взвешенной суммы.

6.2.5. Для каждой альтернативы y , расположенной между центрами классов C_i и C_{i+1} по формулам (6) и (7) вычисляется взвешенное евклидово расстояние до них:

$$d_i(y) = \sqrt{\sum_{j=1}^N w_j (y_j - y_{i,j})^2}, \quad (6)$$

$$d_{i+1}(y) = \sqrt{\sum_{j=1}^N w_j (y_j - y_{i+1,j})^2}. \quad (7)$$

Эти дистанции показывают, насколько альтернатива y «ближе» к центру класса C_i или C_{i+1} с учетом весов критериев.

6.2.6. Выполняется отнесение альтернативы к классу:

- если $d_i(y) < d_{i+1}(y)$, то альтернатива y относится к классу C_i ;
- если $d_i(y) > d_{i+1}(y)$, то альтернатива y относится к классу C_{i+1} ;
- если $d_i(y) = d_{i+1}(y)$, то альтернатива считается находящейся на границе между классами.

6.2.7. Альтернативы, равноудаленные от центров эталонных альтернатив, предъявляются эксперту как вариант границы между классами:

- если эксперт относит альтернативу к классу C_i , то границей класса C_{i+1} будет следующая за ней альтернатива;
- если эксперт относит альтернативу к классу C_{i+1} , то границей класса C_i будет предшествующая ей альтернатива.

Для удобства восприятия экспертом все альтернативы предъявляются ему в вербальной форме.

Это позволяет провести категоризацию территорий по степени экологического благополучия, выделив, например, зоны с высоким, средним и низким уровнем экологического благополучия.

Такой подход к интегральной оценке экологического состояния городских территорий обеспечивает комплексный учет различных экологических факторов, принимая во внимание их относительную важность. Полученные результаты могут быть использованы для принятия обоснованных управленческих решений в сфере городского экологического планирования и природоохранной деятельности.

Использование результатов категоризации

После выполнения категоризации территорий выполняется ряд следующих процедур.

1. Определяются приоритетные зоны для размещения новых постов наблюдения за концентрацией загрязняющих веществ.

2. На основе приоритетных зон и результатов классификации определяются конкретные места для установки постов мониторинга. Дополнительно при определении мест размещения постов для мониторинга качества атмосферного воздуха необходимо применять прогностические модели. Например, потенциальное увеличение числа автомобилей может привести к необходимости изменить класс, к которому относится территория.

3. После установки постов необходимо осуществляется контроль получаемых данных. В случае обнаружения неожиданных или значительных изменений в качестве воздуха, необходимо провести анализ и принять соответствующие управленческие решения.

Выводы

Применение методики категоризации городских территорий не только помогает определить оптимальные места для установки новых постов наблюдения, но и создает систему, ориентированную на долгосрочное управление качеством воздуха. Таким образом городские власти могут сосредоточить свои усилия на наиболее проблемных зонах, что позволит улучшить экологические условия для жителей и обеспечить стратегически обоснованный подход к планированию городской инфраструктуры.

Кроме того, разработанный метод категоризации городских территорий может быть применен не только для управления качеством воздушной среды, но и для решения других пространственно-распределенных экологических задач. Примеры таких задач включают планирование размещения образовательных учреждений, объектов здравоохранения и социальной инфраструктуры [25, 26], что подчеркивает универсальность и многофункциональность предложенного подхода. Это позволяет эффективнее учитывать экологические факторы при принятии управленческих решений, способствуя созданию гармоничной и устойчивой городской среды.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кини Р. Л., Райфа Х. Принятие решений при многих критериях предпочтения и за-мещения. М. : Радио и связь, 1981. 560 с.
2. Olson D. L., Fliendner G., Currie K. Comparison of the REM-BRANDT system with ana-lytic hierarchy process // European Journal of Operational Research. 1995. Vol. 82. Iss. 3. Pp. 522—539.
3. Саати Т., Кернс К. Аналитическое планирование. Организация систем. М. : Радио и связь, 1991. 224 с.
4. Фам В. Т. Применение нечеткого метода анализа иерархий к методу анализа видов и последствий отказов // Computational Nanotechnology. 2021. Т. 8. № 2. С. 29—36. DOI: 10.33693/2313-223X-2021-8-2-29-36.
5. Saaty T. L. Decision making with the analytic hierarchy process // International Journal of Services Sciences. 2002. Vol. 1. Iss. 1. Pp. 83—98.
6. Lootsma F. A. Scale sensitivity in the multiplicative AHP and SMART // Journal of Multi-criteria Decision Analysis. 1993. Vol. 2. Pp. 87—110.
7. Vallee D., Zielniewicz P. ELECTRE 3-4, version 3X. Guide d'Utilisation. Document LAMSADE N 85. Paris : Universite de Paris Dauphine, 1994. 300 p.
8. Niu H., Korchagina E. V. Economic efficiency of digital technology application in energy companies: an analysis based on the Analytic Hierarchy Process // Research Result. Business and Service Technologies. 2024. Vol. 10. Iss. 2. Pp. 175—184. DOI: 10.18413/2408-9346-2024-10-2-1-4.
9. Bojórquez-Tapia L. A., Sánchez-Colon S., Florez A. Building Consensus in Environmental Impact Assessment Through Multicriteria Modeling and Sensitivity Analysis // Environmental Management. 2005. Vol. 36. Iss. 3. Pp. 469—481.
10. Beinat E. Multi-criteria analysis for environmental management // Journal of Multicriteria Decision Analysis. 2001. Vol. 10. Iss. 2. Pp. 51.
11. Bettinger P., Boston K. A conceptual model for describing decision-making situations in in-tegrated natural resource planning and modeling projects // Environmental management. 2001. Vol. 28. Iss. 1. Pp. 1—7.
12. Huang I. B., Keisler J., Linkov I. Multi-criteria decision analysis in environmental sciences: Ten years of applications and trends // Science of The Total Environment. 2011. Vol. 409. Iss. 19. Pp. 3579—3594.

13. *Giordano L. D., Riedel P. S.* Multi-criteria spatial decision analysis for demarcation of greenway: A case study of the city of Rio Claro, Sao Paulo, Brazil // *Landscape and Urban Planning*. 2008. Vol. 84. Pp. 301—311.
14. *Kapepula K. M., Colson G., Sabri K., Thonart P.* A multiple criteria analysis for household solid waste management in the urban community of Dakar // *Waste Management*. 2007. Vol. 27. Pp. 1690—1705.
15. *Mavrotas G., Ziomas I. C., Diakouaki D.* A combined MOIP—MCDA approach to building and screening atmospheric pollution control strategies in urban regions // *Environmental Management*. 2006. Vol. 38. Pp. 149—160.
16. *Norese M.* ELECTRE III as a support for participatory decision-making on the localization of waste-treatment plants // *Land Use Policy*. 2006. Vol. 23. Iss. 1. Pp. 76—85.
17. *Алексеев Н. С., Осипова В. А.* Методика построения полной порядковой классификации при наличии информации о сравнительной важности критериев // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2020. № 11. С. 7—12.
18. *Егорова Е. С., Попова Н. А.* Метод вербального анализа решений для выбора программного обеспечения управления взаимоотношениями с клиентами // *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2019. Т. 7 / № 4(27). С. 37—38. DOI: 10.26102/2310-6018/2019.27.4.038.
19. *Игнатъев А. В., Сидоренко В. Ф., Аброськин А. А.* Ранжирование городских территорий, относящихся к множеству Эджворта — Парето // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2021. Вып. 1(82). С. 220—230.
20. *Кочин Д. Ю.* Построение баз экспертных знаний для интеллектуальных обучающих систем: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.13.01. М., 2006.
21. *Ларичев О. И.* Вербальный анализ решений. М. : Наука, 2006. 181 с.
22. *Петровский А. Б.* Групповой вербальный анализ решений. М. : Наука, 2019. 287 с.
23. *Попова Н. А., Кондрашов А. В.* Снижение размерности и способы построения шкал составных критериев // *Social and economic development and quality of life: history and modern times: Materials of the VIII international scientific conference*. 2018. Prague : Vědecko vydavatelské centrum «Sociosféra-CZ», 2018. С. 37—41.
24. *Фуремс Е. М.* Общий подход к задачам многопризнаковой классификации на основе парадигмы вербального анализа решений // *Искусственный интеллект и принятие решений*. 2019. № 4. С. 47—60. DOI: 10.14357/20718594190406.
25. *Игнатъев А. В., Юрасов Н. А., Куликов М. А.* Использование ГИС-технологий при планировании размещения организаций дошкольного и общего образования // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2023. № 3-4(92). С. 245—251.
26. *Игнатъев А. В., Цыбулина Д. Ю., Куликов М. А., Парыгин Д. С.* QGIS как инструмент разработки интерактивных карт городских общеобразовательных учреждений // *Социология города*. 2023. № 2. С. 94—104. DOI: 10.35211/19943520_2023_2_94.

© *Игнатъев А. В., Куликов М. А.*, 2025

*Поступила в редакцию
в декабре 2024 г.*

Ссылка для цитирования:

Игнатъев А. В., Куликов М. А. Методика оценки экологического благополучия и классификация территорий: подход к улучшению мониторинга загрязнения воздуха // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2025. Вып. 1(98). С. 247—255. DOI: 10.35211/18154360_2025_1_247.

Об авторах:

Игнатъев Александр Владимирович — д-р техн. наук, доц., проф. каф. строительной механики, Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; ORCID: 0000-0003-0733-8808

Куликов Михаил Александрович — зав. учебной лабораторией, Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

Alexander V. Ignatyev, Mikhail A. Kulikov

Volgograd State Technical University

**ENVIRONMENTAL WELL-BEING ASSESSMENT
METHODOLOGY AND TERRITORY CLASSIFICATION:
AN APPROACH TO IMPROVING AIR POLLUTION MONITORING**

**The research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation
No. 22-11-20024, <https://rscf.ru/project/22-11-20024> / and the Volgograd region**

This article proposes a methodology for categorizing urban areas aimed at determining the optimal location and number of control points for air pollution analysis. The methodology is based on a comprehensive multi-criteria assessment using a modified verbal analysis of ORCLASS decisions, which allows ranking and categorizing areas by the level of environmental well-being. The results of such categorization can be effectively used to identify the best locations for installing new pollutant concentration monitoring posts. This, in turn, helps to increase the reliability of air quality assessment and improves environmental management in cities.

Key words: atmospheric air, emissions, pollutants, air pollution monitoring posts, urban area categorization methodology.

For citation:

Ignatyev A. V., Kulikov M. A. [Environmental well-being assessment methodology and territory classification: an approach to improving air pollution monitoring]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2025, iss. 1, pp. 247—255. DOI: 10.35211/18154360_2025_1_247.

About authors:

Alexander V. Ignatyev — Doctor of Engineering Sciences, Docent, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-0733-8808

Mikhail A. Kulikov — Head of the Educational Laboratory, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation