

Интернет-журнал «Отходы и ресурсы» <https://resources.today>
Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling

2026, Том 13, № 2 / 2026, Vol. 13, Iss. 2 <https://resources.today/issue-2-2026.html>

URL статьи: <https://resources.today/PDF/10INOR226.pdf>

DOI: 10.15862/10INOR226 (<https://doi.org/10.15862/10INOR226>)

2.3.4. Управление в организационных системах (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Козеева, О. О. Разработка нечеткой модели для зонирования городского пространства в информационной системе экологического мониторинга / О. О. Козеева // Отходы и ресурсы. — 2026. — Т. 13. — № 2. — URL: <https://resources.today/PDF/10INOR226.pdf>. DOI: 10.15862/10INOR226.

For citation:

Kozeeva O.O. Development of a fuzzy model for urban space zoning for environmental monitoring system. *Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling*. 2026;13(2): 10INOR226. Available at: <https://resources.today/PDF/10INOR226.pdf>. DOI: 10.15862/10INOR226. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 004.9

Козеева Ольга Олеговна

ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)», Калуга, Россия
Старший преподаватель кафедры ИУК6 «Защита информации»
E-mail: blueelectricat@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4704-2614>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=927509

Разработка нечеткой модели для зонирования городского пространства в информационной системе экологического мониторинга

Аннотация. Урбанизация новых территорий и модернизация существующей городской среды ставят целый ряд задач, необходимых для формирования безопасного пространства города с учетом влияния на окружающую среду, а также обуславливают необходимость в разработке средств для повышения эффективности принятия управленческих решений при проведении мероприятий экологического мониторинга. Экологический мониторинг является одним из ключевых направлений развития городского пространства. Так, для контроля предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ в атмосфере необходимо выполнить развертывание сети датчиков-газоанализаторов. При этом требуется определить места расположения датчиков таким образом, чтобы полученная сенсорная сеть обеспечивала возможность оперативного оповещения о наличии загрязнителей с учетом ограничений на количество задействованных узлов в сети. Для этого необходимо принять решение о плотности сети на основе анализа специфики местности, которая включает в себя множество разнородных факторов.

В данной статье представлена математическая модель, разработанная с целью решения задачи зонирования городского пространства в рамках реализации мероприятий по повышению эффективности проведения экологического мониторинга с использованием геоинформационной системы. Предложенная модель основана на формировании оценок экологических рисков местности с использованием методов нечеткой логики. В рамках данной работы сформирована соответствующая проектная процедура, включающая формирование концептуальной модели оценки экологических угроз, интегрирующей основные факторы загрязнения городской среды, математическую формализацию экологических рисков средствами теории нечетких множеств,

разработку модели взаимного влияния факторов загрязнения и уровня экологической опасности, а также оценку экологических рисков на базе данной модели.

Ключевые слова: геоинформационная система; экологический мониторинг; нечеткая логика; сенсорная сеть; датчики экологического мониторинга; зонирование городского пространства; принятие решений

Введение

Актуальность данной работы обусловлена тем, что в 2024 году было завершено формирование нового национального проекта «Экологическое благополучие», в рамках которого сформирован комплекс первоочередных мер, направленных на формирование экологически безопасного городского пространства. Данные меры включают разработку нормативно-технической базы в области эколого-ориентированного градостроительного проектирования и осуществление межведомственной интеграции в сфере цифровизации природоохранной деятельности.

Геоинформационные системы (ГИС) играют ключевую роль в экологическом мониторинге городских территорий, обеспечивая возможность сбора, хранения, анализа и визуализации пространственно-распределенных данных о состоянии окружающей среды [1–3]. С помощью ГИС можно интегрировать разнородную информацию: результаты измерений концентраций загрязняющих веществ от стационарных и мобильных датчиков, метеорологические данные, сведения о расположении промышленных объектов, транспортных магистралей, жилой застройки и зеленых зон. ГИС позволяет проводить пространственный анализ, выявлять зоны повышенного экологического риска, моделировать распространение загрязнений с учетом различных факторов, а также визуализировать результаты в виде интерактивных карт, что обуславливает применение ГИС в качестве инструмента для поддержки принятия решений при планировании природоохранных мероприятий, оптимизации сетей экологического мониторинга [1–4].

В данной работе рассматривается один из этапов разработки геоинформационной системы (рис. 1), направленной на повышение эффективности мероприятий по принятию решений в рамках реализации задач экологического мониторинга в масштабе городского пространства.

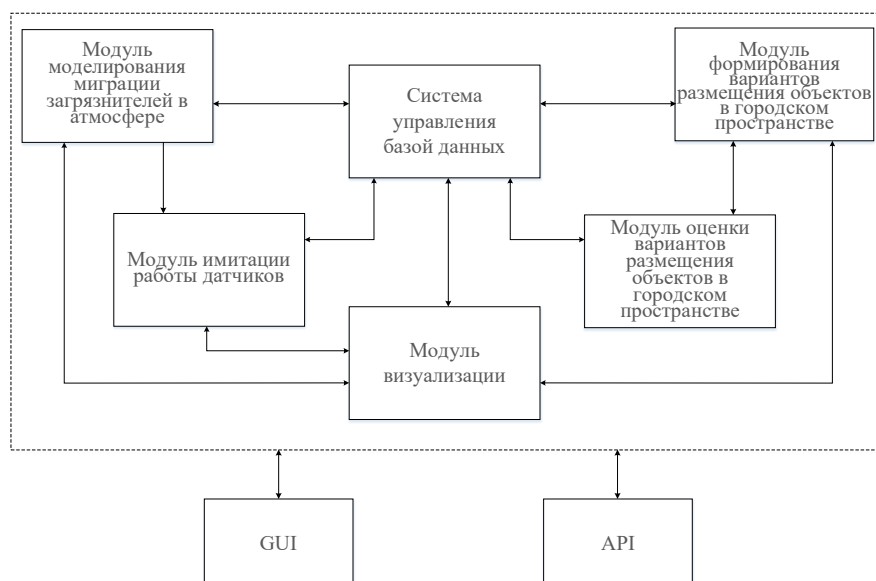


Рисунок 1. Структурная схема ГИС экологического мониторинга (разработано автором)

В рамках реализации функций данной системы ставится задача синтеза схемы размещения датчиков экологического мониторинга в городском пространстве. Развертывание крупномасштабной сенсорной сети для мониторинга качества воздуха в городах связано с определением мест размещения датчиков. Для точного отслеживания локальных источников загрязнения требуется высокая плотность датчиков. Кроме того, в местах размещения датчиков необходимо наличие инфраструктуры для обеспечения электропитания датчиков и передачи данных, а также необходимо учитывать такие факторы, как увеличение экологических рисков в случаях, когда рассматриваемая местность включает в себя промышленные объекты или объекты социального значения [5–8].

Для решения задачи оптимального размещения датчиков необходимо учитывать не только нормативные требования к предельно допустимым концентрациям, но и пространственную неоднородность городской среды и различные факторы, такие как преобладающие воздушные потоки, плотность застройки, типы зданий и сооружений [9; 10]. В существующих решениях часто применяются детерминированные модели рассеивания примесей (например, на основе уравнений конвекции-диффузии). В данной работе приводится подход, направленный на повышение их эффективности, сочетающий применение аппарата нечеткой логики для первичного зонирования городской территории с последующими развертыванием сети датчиков и имитационным моделированием [11].

Целью данной работы является повышение эффективности проведения мероприятий по экологическому мониторингу и поддержке принятия решений на основе реализации задачи оптимального развертывания сети датчиков контроля превышения предельно допустимых концентраций (ПДК) загрязняющих веществ в атмосфере. В данной статье приводится разработка математической модели зонирования городского пространства для определения мест размещения датчиков при оценке особенностей местности и с целью выработки эффективных управленческих решений при реализации задач экологического мониторинга.

Основная часть

Для достижения поставленной цели установлена следующая последовательность задач, которые необходимо решить:

1. Формирование концептуальной модели оценки экологических угроз, интегрирующей основные факторы загрязнения городской среды.
2. Математическая формализация экологических рисков средствами теории нечетких множеств.
3. Разработка математической модели взаимного влияния факторов загрязнения и уровня экологической опасности.
4. Оценка экологических рисков на основе разработанной модели.

Математически нечеткая карта может быть представлена в виде (1):

$$G = (V, E, W) \quad (1)$$

где:

$V = \{v_i\}, i = 1, 2, \dots, n$ — множество вершин (концептов);

$E = \{e_{ij}\}, i, j = 1, 2, \dots, n$ — множество дуг, отражающих взаимосвязи между концептами;

$W = \{w_{ij}\}, i, j = 1, 2, \dots, n$ — множество весов дуг, характеризующих силу влияния концептов друг на друга [9].

Применение аппарата нечеткой логики обусловлено необходимостью учета слабоформализуемых взаимосвязей между факторами экологического риска, такими как, например, влияние высотности застройки на рассеивание загрязнений. В отличие от классических регрессионных моделей, нечеткая карта позволяет задавать веса связей на основе экспертных знаний и проводить сценарный анализ [12–15].

В контексте оценки экологического состояния городского пространства выделены следующие группы параметров:

- Источники загрязнения (промышленные предприятия).
- Природно-климатические факторы (преобладающие воздушные потоки, температурный режим).
- Антропогенные характеристики (типы зданий и сооружений).
- Показатели состояния окружающей среды (концентрации вредных веществ).

Определены следующие лингвистические переменные и их диапазоны:

1. Уровень загрязнения водных объектов (0–100 %).
2. Уровень загрязнения атмосферы (0–100 %).
3. Вероятность природных катаклизмов (0–100 %).
4. Топография местности (сложный рельеф местности) (0–10 баллов).
5. Высотность зданий и сооружений (неравномерная застройка) (0–10 баллов).
6. Объекты социального назначения (0–10 баллов).
7. Промышленные объекты (0–10 баллов).
8. Состояние инженерной инфраструктуры (0–10 баллов).
9. Класс опасности ОЭВ (1–4 класс).
10. Интегральный риск (0–100 %).

Для лингвистических переменных «Уровень загрязнения водных объектов», «Уровень загрязнения атмосферы», «Вероятность природных катаклизмов» задан следующий термножество:

$$T(R) = \{ \text{«Низкий»}, \text{«Средний»}, \text{«Высокий»}, \text{«Критический»} \}$$

Функция принадлежности для термов выражена следующим образом:

$$\mu_{\text{низкий}}(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } x \leq 20 \\ (40 - x)/20, & \text{если } 20 < x < 40 \\ 0, & \text{если } x \geq 40 \end{cases}$$
$$\mu_{\text{средний}}(x) = \begin{cases} (x - 30)/20, & \text{если } 30 \leq x < 50 \\ 1, & \text{если } 50 \leq x \leq 60 \\ (80 - x)/20, & \text{если } 60 < x \leq 80 \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

$$\mu_{\text{высокий}}(x) = \begin{cases} (x - 60)/20, & \text{если } 60 \leq x < 80 \\ 1, & \text{если } 80 \leq x \leq 90 \\ (100 - x)/10, & \text{если } 90 < x \leq 100 \end{cases}$$
$$\mu_{\text{критический}}(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } x \leq 80 \\ (x - 80)/20, & \text{если } 80 < x \leq 100 \end{cases}$$

Для лингвистических переменных «Топография местности», «Высотность зданий и сооружений», «Объекты социального назначения», «Промышленные объекты», «Состояние инженерной инфраструктуры» задан следующий терм-множество:

$$T(R) = \{ \text{«Очень низкий»}, \text{«Низкий»}, \text{«Средний»}, \text{«Высокий»}, \text{«Очень высокий»} \}$$

Функция принадлежности для термов выражена следующим образом:

$$\mu_{\text{очень низкий}}(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } x \leq 2 \\ (4 - x)/2, & \text{если } 2 < x < 4 \\ 0, & \text{если } x \geq 4 \end{cases}$$

$$\mu_{\text{низкий}}(x) = \begin{cases} (x - 1)/2, & \text{если } 1 \leq x < 3 \\ 1, & \text{если } 3 \leq x \leq 4 \\ (6 - x)/2, & \text{если } 4 < x \leq 6 \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

$$\mu_{\text{очень высокий}}(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } x \leq 7 \\ (x - 7)/2, & \text{если } 7 < x \leq 9 \end{cases}$$

$$\mu_{\text{средний}}(x) = \begin{cases} (x - 3)/2, & \text{если } 3 \leq x < 5 \\ 1, & \text{если } 5 \leq x \leq 6 \\ (8 - x)/2, & \text{если } 6 < x \leq 8 \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

$$\mu_{\text{высокий}}(x) = \begin{cases} (x - 5)/2, & \text{если } 5 \leq x < 7 \\ 1, & \text{если } 7 \leq x \leq 8 \\ (10 - x)/2, & \text{если } 8 < x \leq 10 \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

Для лингвистической переменной «Класс опасности ОЭВ» задан следующий терм-множество:

$$T(R) = \{ \text{«Четвертый класс»}, \text{«Третий класс»}, \text{«Второй класс»}, \text{«Первый класс»} \}$$

Распределение веществ по классам регулируется стандартом ГОСТ 12.1.007-76.

Функция принадлежности для термов выражена следующим образом:

Четвертый класс опасности (малоопасные вещества):

$$\mu_{4 \text{ класс}}(c) = \{1 \text{ если } c = 4, 0 \text{ иначе}\}$$

Третий класс опасности (умеренно опасные вещества):

$$\mu_{3 \text{ класс}}(c) = \{1 \text{ если } c = 3, 0 \text{ иначе}\}$$

Второй класс опасности (высокоопасные вещества):

$$\mu_{2 \text{ класс}}(c) = \{1 \text{ если } c = 2, 0 \text{ иначе}\}$$

Первый класс опасности (чрезвычайно опасные вещества):

$$\mu_{1 \text{ класс}}(c) = \{1 \text{ если } c = 1, 0 \text{ иначе}\}$$

Для лингвистической переменной «Интегральный риск» задан следующий терм-множество:

$$T(R) = \{ \text{«Минимальный»}, \text{«Допустимый»}, \text{«Повышенный»}, \text{«Высокий»}, \text{«Чрезвычайный»} \}$$

Для интегрального риска функция принадлежности выражена следующим образом:

$$\mu_{\text{минимальный}}(r) = \begin{cases} 1, & \text{если } r \leq 10 \\ (30 - r)/20, & \text{если } 10 < r < 30 \\ 0, & \text{если } r \geq 30 \end{cases}$$

$$\mu_{\text{допустимый}}(r) = \begin{cases} (r - 20)/15, & \text{если } 20 \leq r < 35 \\ 1, & \text{если } 35 \leq r \leq 45 \\ (60 - r)/15, & \text{если } 45 < r \leq 60 \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

$$\mu_{\text{повышенный}}(r) = \begin{cases} (r - 40)/20, & \text{если } 40 \leq r < 60 \\ 1, & \text{если } 60 \leq r \leq 70 \\ (90 - r)/20, & \text{если } 70 < r \leq 90 \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

$$\mu_{\text{высокий}}(r) = \begin{cases} (r - 70)/15, & \text{если } 70 \leq r < 85 \\ 1, & \text{если } 85 \leq r \leq 90 \\ (100 - r)/10, & \text{если } 90 < r \leq 100 \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

$$\mu_{\text{чрезвычайный}}(r) = \begin{cases} 0, & \text{если } r \leq 85 \\ (r - 85)/15, & \text{если } 85 < r \leq 100 \end{cases}$$

Таким образом, сформирован базис правил нечеткого вывода и сформулированы основные положения экспертной оценки для формирования матрицы смежности (табл. 1) нечеткого ориентированного графа (рис. 2) взаимосвязей факторов экологического риска (нечеткой карты).

Таблица 1

Матрица смежности нечеткой карты оценки экологических рисков

Оценка экологических рисков	Уровень загрязнения водных объектов	Уровень загрязнения атмосферы	Вероятность природных катаклизмов	Топография местности (сложный рельеф местности)	Высотность зданий и сооружений (неравномерная застройка)	Объекты социального назначения	Промышленные объекты	Состояние инженерной инфраструктуры	Класс опасности ОЭВ	Интегральная оценка риска
Уровень загрязнения водных объектов	0,00	0,30	0,00	0,00	0,00	0,30	0,00	0,00	0,00	0,70
Уровень загрязнения атмосферы	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30	0,00	0,00	0,00	0,70
Вероятность природных катаклизмов	0,70	0,70	0,00	0,00	0,00	0,50	0,70	-0,70	0,00	0,90
Топография местности (сложный рельеф местности)	0,70	0,00	0,50	0,00	0,70	0,00	0,00	-0,50	0,00	0,30
Высотность зданий и сооружений (неравномерная застройка)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	0,00	-0,30	0,00	0,30
Объекты социального назначения	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,90
Промышленные объекты	0,90	0,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,50	0,00	0,70
Состояние инженерной инфраструктуры	-0,30	-0,30	-0,50	0,00	0,00	-0,70	-0,50	0,00	0,00	-0,90
Класс опасности ОЭВ	0,50	0,50	0,00	0,00	0,00	0,70	0,30	0,00	0,00	0,90
Интегральная оценка	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Разработано автором

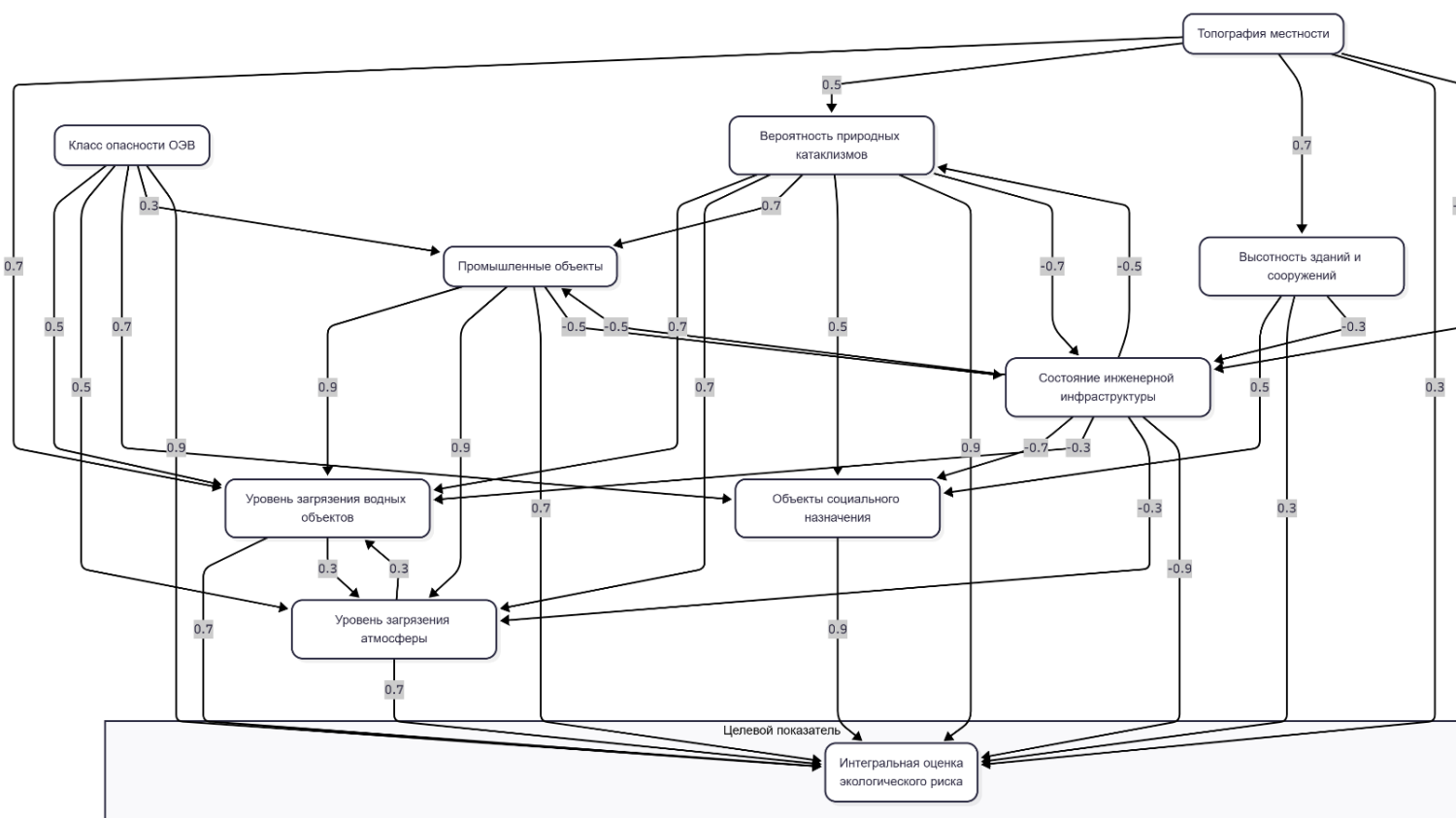


Рисунок 2. Нечеткая когнитивная карта
оценки экологических рисков (разработано автором)

На основе разработанной модели сгенерированы следующие сценарии для тестирования системы нечеткого вывода (табл. 2):

Таблица 2

Сценарии моделирования

Параметры/Сценарий	Благополучная местность	Промышленная зона с развитой инфраструктурой	Мегаполис с комплексными проблемами	Зона техногенной катастрофы
Уровень загрязнения водных объектов	15 % (Низкий)	65 % (Средний-Высокий)	70 % (Высокий)	95 % (Критический)
Уровень загрязнения атмосферы	20 % (Низкий)	70 % (Средний-Высокий)	85 % (Высокий-Критический)	90 % (Критический)
Вероятность природных катаклизмов	10 % (Низкий)	25 % (Низкий)	45 % (Средний)	60 % (Средний-высокий)
Топография местности	3 балла (Низкий)	5 баллов (Средний)	5 баллов (Средний)	8 баллов (Высокий)
Высотность зданий и сооружений	4 балла (Низкий)	6 баллов (Средний)	9 баллов (Очень высокий)	4 балла (Низкий)
Объекты социального назначения	2 балла (Очень низкий)	3 балла (Низкий)	9 баллов (Очень высокий)	1 балл (Очень низкий)
Промышленные объекты	1 балл (Очень низкий)	8 баллов (Высокий)	7 баллов (Высокий)	10 баллов (Очень высокий)
Состояние инженерной инфраструктуры	8 баллов (Высокий)	7 баллов (Высокий)	6 баллов (Средний)	1 балл (Очень низкий)
Класс опасности ОЭВ	4	3	2	1
Интегральный риск	Минимальный (15–25 %)	Повышенный (45–60 %)	Высокий (75–85 %)	Чрезвычайный (95–100 %)

Разработано автором

Из представленной таблицы видно, что при переходе от «Благополучной местности» к «Зоне техногенной катастрофы» интегральный риск возрастает с минимального (15–25 %) до чрезвычайного (95–100 %). Наибольший вклад в рост риска вносят такие факторы, как уровень загрязнения атмосферы, класс опасности веществ и наличие промышленных объектов. При этом высотность застройки в сценарии «Мегаполис с комплексными проблемами» увеличивает риск из-за ухудшения условий рассеивания выбросов, а в зоне техногенной катастрофы наоборот, снижает, что демонстрирует нелинейный характер взаимосвязей.

На рисунке 3 показано сравнение факторов экологического риска по различным сценариям:

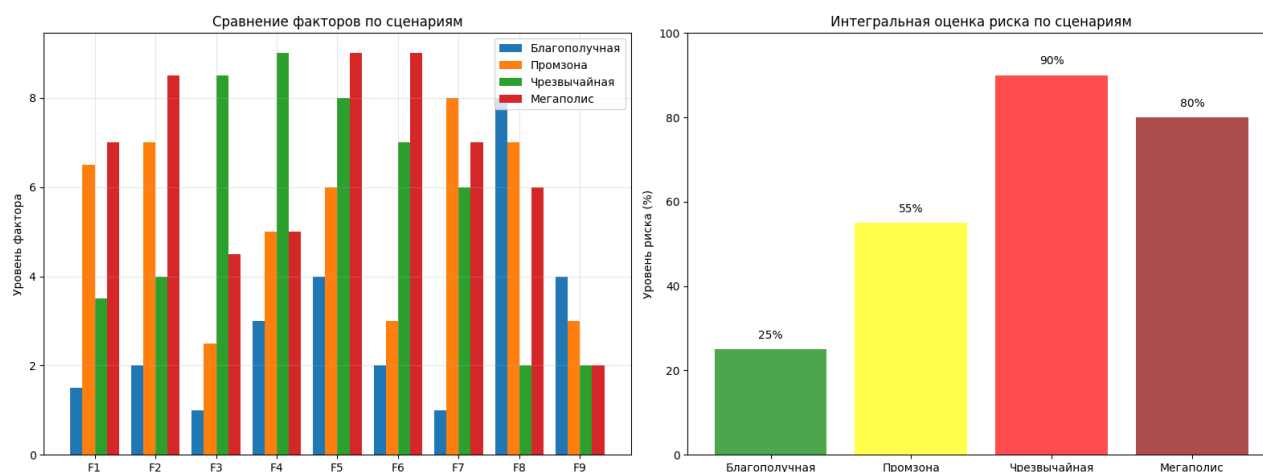


Рисунок 3. Сравнение факторов экологического риска (разработано автором)

Полученные результаты демонстрируют, как модель реагирует на изменение входных факторов, и представляют наглядную карту рисков для дифференциации управленческих стратегий контроля — от низкой плотности сети в безопасных зонах до максимальной в критических.

На основе рассчитанных значений интегрального риска предлагается следующая шкала для определения плотности размещения датчиков экологического мониторинга:

- Минимальный риск (0–30 %) — фоновый мониторинг, 1 датчик на 5–10 км².
- Допустимый риск (30–50 %) — базовый мониторинг, 1 датчик на 2–5 км².
- Повышенный риск (50–70 %) — усиленный мониторинг, 1 датчик на 0,5–1 км².
- Высокий риск (70–90 %) — локальный мониторинг, 1 датчик на 0,2–0,5 км².
- Чрезвычайный риск (90–100 %) — сплошной мониторинг, 1 датчик на 50–100 м², с обязательной интеграцией в систему оповещения.

Данная градация позволяет автоматизировать процесс зонирования в ГИС и формировать рекомендации для городских служб.

Заключение

В результате выполненного исследования разработан метод зонирования городского пространства на основе оценки экологических рисков с использованием аппарата нечеткой логики. Данный метод используется для реализации функций ГИС экологического мониторинга. Предложенная проектная процедура включает формирование концептуальной модели экологических угроз, математическую формализацию рисков средствами теории нечетких

множеств, построение нечеткой карты взаимовлияния факторов загрязнения и расчет интегрального риска. Разработанная нечеткая модель позволяет учитывать качественные и количественные факторы (загрязнение атмосферы и водных объектов, топографию, плотность застройки, расположение социальных и промышленных объектов, класс опасности веществ). Тестирование модели на четырех сценариях («Благополучная местность», «Промышленная зона», «Мегаполис с комплексными проблемами», «Зона техногенной катастрофы») подтвердило корректную дифференциацию интегрального риска от минимального до чрезвычайного уровня. Предложенный подход позволяет обоснованно определять приоритетные места размещения датчиков экологического мониторинга, оптимизировать плотность сенсорной сети и повысить эффективность мероприятий по контролю загрязнений в городской среде.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ганиева, С. А. Экологический мониторинг на основе ГИС и спутниковых геодезических измерений и создание цифровых электронных карт / С. А. Ганиева // Инвестиции, градостроительство, недвижимость как драйверы социально-экономического развития территории и повышения качества жизни населения: Материалы XII Международной научно-практической конференции. В 2-х частях, Томск, 01–04 марта 2022 года / Под редакцией Т. Ю. Овсянниковой, И. Р. Салагор. Том Часть 2. — Томск: Томский государственный архитектурно-строительный университет, 2022. — С. 683–691. — EDN DGYQEP.
2. Трегубова, М. А. Использование ГИС в решении задач экологического мониторинга / М. А. Трегубова // Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании "НИТ 2014": материалы XIX Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов, Рязань, 12–14 ноября 2014 года. — Рязань: Рязанский государственный радиотехнический университет, 2014. — С. 239–240. — EDN TTYAON.
3. Козеева, О. О. ГИС экологического мониторинга в городской среде / О. О. Козеева // Вестник Череповецкого государственного университета. — 2024. — № 1(118). — С. 37–47. — DOI 10.23859/1994-0637-2024-1-118-2. — EDN LPCYFG.
4. Kozeeva O. O., Chukhraev I. V. Development of Algorithmic Support for the Geoinformation System Intended for Urban Space and Environment Design // 2024 6th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). — IEEE, 2024. — С. 1–6. — DOI: 10.1109/REEPE60449.2024.10479893.
5. Панарин, В. М. Автоматизированный мониторинг загрязнения атмосферного воздуха промышленно развитых территорий / В. М. Панарин, А. А. Маслова, С. А. Савинкова. — Тула: Тульский государственный университет, 2021. — 219 с. — ISBN 978-5-7679-4817-8. — EDN ZDKTXH.
6. Выбор градостроительных решений по снижению загрязнения атмосферного воздуха в жилых районах выбросами автомобильного транспорта / М. А. Пинигин, В. Ф. Сидоренко, А. В. Антюфеев, В. В. Балакин // Гигиена и санитария. — 2021. — Т. 100, № 2. — С. 92–98. — DOI 10.47470/0016-9900-2021-100-2-92-98. — EDN BGEMUA.
7. Nejadkoorki, F., Nicholson, K. & Hadad, K. The design of long-term air quality monitoring networks in urban areas using a spatiotemporal approach. Environ Monit Assess 172, 2011. — pp. 215–223. — DOI: 10.1007/s10661-010-1328-4.

8. Réquia Júnior, W.J., Roig, H.L., & Koutrakis, P. A spatial multicriteria model for determining air pollution at sample locations. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2015. — Vol. 65(2). — pp. 232–243. — DOI: <https://doi.org/10.1080/10962247.2014.971976>.
9. Маслова, А. А. Оценка существующих архитектурно-планировочных и конструктивно-технологических решений с точки зрения их экологической безопасности / А. А. Маслова, А. Н. Коваленко // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. — 2025. — № 2(99). — С. 241–251. — DOI 10.35211/18154360_2025_2_241. — EDN FXRESZ.
10. Панарин, В. М. Роль оценки воздействия на окружающую среду в выявлении экологических рисков и угроз / В. М. Панарин, А. А. Маслова, А. Н. Коваленко // Приоритетные направления развития науки и технологий: XXXVI Международная научно-практическая конференция, Тула, 28 мая 2025 года. — Тула, 2025. — С. 15–17. — EDN MXHOCJ.
11. Козеева, О. О. Имитационная модель работы датчиков экологического мониторинга в городском пространстве на основе диаграммы Вороного / О. О. Козеева // Цифровые системы и модели: теория и практика проектирования, разработки и применения: Материалы национальной (с международным участием) научно-практической конференции, Казань, 10–11 апреля 2024 года. — Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2024. — С. 243–247. — EDN GYBFVV.
12. Борисов, В. В. Нечеткие модели и сети: учебное пособие / В. В. Борисов, В. В. Круглов, А. С. Федюлов. — 2-е изд., стер. — Москва: Горячая линия-Телеком, 2012. — 284 с. — ISBN 978-5-9912-0283-1. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/5126>.
13. Баденко, В. Л. Анализ экологических рисков в ГИС на основе нечетких множеств / В. Л. Баденко // Информация и космос. — 2013. — № 3-4. — С. 78–84. — EDN RMULRR.
14. Fisher B.E.A. Fuzzy approaches to environmental decisions: application to air quality // *Environmental Science & Policy*. — 2006. — Т. 9. — № 1. — С. 22–31. — DOI: 10.1016/j.envsci.2005.08.006.
15. Enea M., Salemi G. Fuzzy approach to the environmental impact evaluation // *Ecological Modelling*. — 2001. — Т. 136. — № 2-3. — С. 131–147. — DOI: 10.1016/S0304-3800(00)00380-X.

Kozeeva Olga Olegovna

Bauman Moscow State Technical University (National Research University), Kaluga, Russia

E-mail: blueelectricat@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4704-2614>

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=927509

Development of a fuzzy model for urban space zoning for environmental monitoring system

Abstract. The urbanization of new territories and the modernization of existing urban environments pose a number of challenges necessary for creating a safe urban environment, taking into account its environmental impact. Environmental monitoring is a key area of urban development. For example, to monitor maximum permissible concentrations of pollutants in the atmosphere, a network of gas analyzers must be deployed. Sensor locations must be determined so that the resulting sensor network can provide prompt alerts on the presence of pollutants, while respecting the limitations on the number of nodes involved in the network. This requires a decision on network density based on an analysis of the specific terrain, which includes many diverse factors.

This article presents a mathematical model developed to address the problem of urban zoning as part of measures to improve the effectiveness of environmental monitoring using a geographic information system. The proposed model is based on generating environmental risk assessments for a given area using fuzzy logic methods. Within the framework of this work, a corresponding project procedure was developed, including the formation of a conceptual model for assessing environmental threats, integrating the main factors of urban pollution, the mathematical formalization of environmental risks by means of fuzzy set theory, the development of a model for the mutual influence of pollution factors and the level of environmental hazard, as well as an assessment of environmental risks based on this model.

Keywords: geographic information system; environmental monitoring; fuzzy logic; sensor network; environmental monitoring sensors; urban zoning; decision making