

УДК 519.868

DOI: [10.26102/2310-6018/2020.28.1.041](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2020.28.1.041)

Ситуационная модель системы принятия решений на основе данных экологического мониторинга в условиях развития городских территорий

И.Г. Иванова, А.Д. Данилов, К.Ю. Гусев

*Воронежский государственный технический университет, Воронеж,
Российская Федерация*

Резюме: В работе представлена модель системы принятия решений на основе экологического мониторинга. Загрязнение атмосферного воздуха современных городов очень актуальная проблема, которая решается на самых разных уровнях управления. Самым сильным источником загрязнения является автотранспортная сеть. Однако управление автомобильными потоками внутри городских территорий является невыполнимой или трудновыполнимой задачей по причине наличия существующей инфраструктуры города. Поэтому, предлагается система, которая по результатам обучения в условиях существующих городов будет формировать рекомендации по развитию городских территорий с учетом уровня загрязнения воздуха. В работе предлагается нечеткая система поддержки принятия решений в условиях развития городских территорий. Показано формирование базы знаний на ретроспективных данных для повышения точности прогнозирования, а также из имитационной среды моделирования для повышения скорости обучения. Проранжированы рекомендации по уменьшению загрязнения атмосферного воздуха в условиях развития городских территорий. В нечеткой ситуационной модели предложен способ выбора наиболее близкой, равной ситуации из базы знаний с учетом максимального значения степени принадлежности. Разработанные модели могут быть применены как средство повышения качества управления и принятия решений в условиях развития городских территорий.

Ключевые слова: принятие решений, экологический мониторинг, нечеткие системы, управление, моделирование.

Для цитирования: Иванова И.Г., Данилов А.Д., Гусев К.Ю. Ситуационная модель системы принятия решений на основе данных экологического мониторинга в условиях развития городских территорий. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2020;8(1). Доступно по: https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2020/02/IvanovaSoavtori_1_20_1.pdf DOI: 10.26102/2310-6018/2020.28.1.041

Situational model of decision-making system based on environmental monitoring data in the conditions of urban development

I.G. Ivanova, A.D. Danilov, K.Y. Gusev

Voronezh state technical University, Voronezh, Russian Federation

Abstract: The paper presents a model of a decision-making system based on environmental monitoring. Air pollution in modern cities is a very urgent problem that is solved at various levels of management. The largest source of pollution is the road network. However, managing traffic flows within urban areas is an impossible or difficult task because of the existing infrastructure of the city. Therefore, we propose

a system that, based on the results of training in existing cities, will form recommendations for the development of urban areas, taking into account the level of air pollution. The paper proposes a fuzzy system for supporting decision-making in the conditions of urban development. The article shows the formation of a knowledge base based on retrospective data to improve the accuracy of forecasting, as well as from the simulation environment for increasing the speed of sensing. Ranked recommendations for reduction of pollution of atmospheric air under conditions of development of urban areas. In the fuzzy situational model, a method is proposed for selecting the closest, equal situation from the knowledge base, taking into account the maximum value of the degree of belonging. The developed models can be used as a means of improving the quality of management and decision-making in the conditions of urban development.

Keywords: decision-making, environmental monitoring, fuzzy systems.

For citation: I.G. Ivanova, A.D. Danilov, K.Y. Gusev Situational model of decision-making system based on environmental monitoring data in the conditions of urban development. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2020;8(1). Available from: https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2020/02/IvanovaSoavtori_1_20_1.pdf DOI: 10.26102/2310-6018/2020.28.1.041 (In Russ).

Введение

Загрязнение воздуха в современном городе является серьезной помехой в развитии городских территорий. Плотная застройка современных городов России, с узкими улицами и зачастую с отсутствием тротуаров, задачу снижения уровня загрязняющих и вредных веществ в центральных частях мегаполисов делает сложной или невыполнимой. Но с другой стороны, городская территория постоянно увеличивается за счет построек новых районов и микрорайонов, жилых массивов и коттеджных поселков и регулирование концентраций загрязняющих и вредных веществ должно быть обязательным на этапе их развития. В настоящее время имеется множество источников загрязнения атмосферного воздуха в условиях городских территорий: автотранспорт, производственные предприятия, индивидуальные котельные, несанкционированные свалки мусора и т.д. [1]. Однако со временем большинство источников загрязнения в городах устраняют: предприятия переносят за пределы жилых районов, котельные обеспечивают преимущественно газовым топливом для уменьшения выбросов в атмосферу, автотранспорт переводят на газовое топливо или на электрическую тягу. Но, не смотря на масштабные мероприятия по минимизации выбросов в атмосферу, наиболее динамичным является автотранспортная городская сеть. Согласно отчетам Министерства транспорта РФ ежегодный прирост количества автомобилей в России составляет 7-10% [2].

Эта тенденция непосредственно отражается и на количестве загрязняющих веществ, поступающих в атмосферу от автотранспорта, которое составляет более 90% от совокупного выброса всех загрязняющих веществ. Но управление дорожной ситуацией внутри существующих городов – задача экономически затратная и технически сложно реализуемая.

Предлагается использовать модели, полученные при анализе уровня загрязнения атмосферного воздуха в существующих городах, при принятии решений в условиях развития городских территорий для повышения их эффективности.

Материалы и методы

Предлагаемая ситуационная модель включает в себя три основных блока [3]:

- блок оценки состояний (блок фаззификации);
- блок принятия решений, составленных из базы знаний;
- блок выдачи управляющего воздействия (блок дефаззификации).

Формируются лингвистические переменные:

$$X_i < \text{«Концентрация»}, T_x, [0, P_i] >,$$

$$Y_i < \text{«Средний уровень загрязнения»}, T_y, [0, 1] >,$$

где $T_x = \{\text{«малая»}, \text{«средняя»}, \text{«достаточно высокая»}, \text{«высокая»}\}$, $T_y = \{\text{«малый»}, \text{«средний»}, \text{«достаточно высокий»}, \text{«высокий»}\}$, P_i – ПДК*3 для каждого из исследуемых загрязняющих веществ, а семантическое правило, которое ставит соответствие каждой нечеткой переменной из множества T_x, T_y нечеткое множество \tilde{C}_{xi} и \tilde{C}_{yi} , изображенные на рисунке 1.

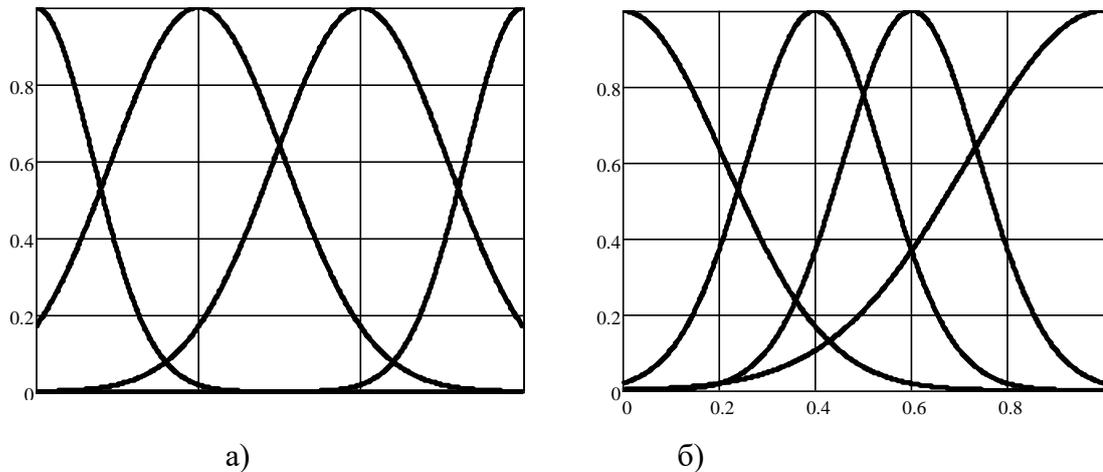


Рисунок 1 - а) Функции принадлежности нечеткого множества \tilde{C}_{xi} ,
 б) Функции принадлежности нечеткого множества \tilde{C}_{yi} .

$$\mu(a_i) = \exp \left[- \left(\frac{a_i - x_i^k}{s_i^k} \right)^2 \right],$$

где $i = 1, \dots, n$; n – количество входов нечеткой модели, а параметры функции имеют интерпретацию: x – это центр, а s – ширина гауссовой кривой.

Блок оценки состояний. В качестве вектора входных данных C (12×1) используются концентрации шести основных компонентов загрязнения атмосферного воздуха в центре перекрестка и шести вблизи жилой застройки, т.е. признаки, значениями которых описывается состояние исследуемого объекта: диоксид азота, взвешенные вещества, серы диоксид, углерода оксид, фенол и формальдегид.

Анализ состояния атмосферного воздуха на выбранных участках проводился по величине максимально разовой концентрации по центру перекрестка и у ближайшей жилой застройки приоритетных загрязняющих веществ. Для зависимости концентрации загрязняющих веществ по центру перекрестка и концентрации вблизи жилой застройки получено уравнение регрессии:

$$C_{ж.з.} = 0,031 + 0,7615 * C_{ц.п.} - 0,0878 * C_{ц.п.}^2.$$

где $C_{ц.п.}$ – концентрация загрязняющих веществ по центру перекрестка, $C_{ж.з.}$ – концентрация загрязняющих веществ вблизи жилой застройки.

Полученная регрессионная модель применяется в случаях неполной определенности входного вектора и для повышения точности функционирования нечеткой ситуационной модели. Таким образом, входной вектор имеет следующий вид:

$$C^T = (c_1, \dots, c_6, c_7, \dots, c_{12}),$$

где $c_1 \dots c_6$ – концентрации веществ по центру исследуемого перекрестка, $c_7 \dots c_{12}$ – концентрации веществ вблизи жилой застройки.

Концентрация загрязняющих веществ C описывается лингвистической переменной $X_i \langle C, T, D_i \rangle, i=1, \dots, n$, а для описание термов T , соответствующих концентрациям загрязняющих веществ C , используются нечеткие переменные $\langle T_i, D_i, C_i \rangle$ [4]. Таким образом, полученная нечеткая ситуация есть нечеткое множество второго уровня:

$$s = \{\{\mu_s(C)/C\}\}$$

где

$$\mu_s(C) = \{\{\mu_{\mu_s(C)}(T_i)/T_i\}\}$$

При подаче на вход ситуационной модели входного вектора $C(12 \times 1)$ на выходе блока фаззификации получится вектор $S_0(12 \times 4)$, состоящий из функций принадлежности входных концентраций к лингвистической переменной «Концентрация». Получившаяся ситуация s подается на вход следующего блока принятия решений.

База знаний. В данном случае база знаний является ключевым блоком при формировании управляющего воздействия [5]. В работе используется база знаний, в которой хранятся пары матриц типа:

*<Нечеткая ситуация(текущие значения концентраций)>-
 <Обобщенная оценка уровня загрязнения (прогноз)>.*

Нечеткая ситуация представляет собой матрицу, идентичную матрице $S_i(12 \times 4), i=1, \dots, k$, полученной в блоке фаззификации. Составляется матрица S аналогичным образом при помощи описанного выше блока и функций принадлежности. Второй элемент пары представляет собой вектор $R_i(1 \times 4), i=1, \dots, k$, полученный с помощью лингвистической переменной Y и соответствующих функций принадлежности (рисунок 2). Таким образом, база знаний имеет явный вид и представляет собой запись размерностью $(k \times 2)$ [6].

При формировании базы знаний использовались два основных подхода:

1) формирование пар в базу знаний по ретроспективным данным, с помощью функций принадлежности лингвистических переменных X и Y . На этом этапе формируется эталонные ситуации (экспертным путем), используемые в дальнейшем при составлении прогноза;

2) формирование пар в базу знаний по экспертным оценкам текущего состояния загрязнения. На данном этапе из экспертных оценок в явном виде формируется вектор $R_i(1 \times 4), i=1, \dots, k$.

Блок принятия решений. На данном этапе моделирования реализуются возможные отношения на нечетких ситуациях. Для выбора управляющего решения используется степень равенства:

$$\mu(S_0, S_i) = v(S_0, S_i) \& v(S_i, S_0),$$

где $i=1, \dots, k, \mu$ – степень равенства нечетких ситуаций, v – степень включения нечетких ситуаций. То есть в данном блоке происходит сравнение ситуации, полученной из входных данных с эталонными ситуациями в базе знаний. В работе не уделяется внимание путям оптимизации поиска по максимальной степени равенства и используется метод прямого перебора всех возможных вариантов и предлагается

использовать следующий вариант выбора управляющего воздействия [7]:

$\mu_{\max} > 0,9$	Принимать R_c наибольшей степенью равенства
$0,5 < \mu_{\max} < 0,9$	Выбрать ситуации с тремя наибольшими степенями равенства и результирующее множество R получить путём пересечения выбранных $R = R_{\mu_{\max}} \cap R_{\mu_{\max-i}}, i = 1, \dots, 3$
$\mu_{\max} < 0,5$	Выбрать ситуации с пятью наибольшими степенями равенства и результирующее множество R получить путём пересечения выбранных $R = R_{\mu_{\max}} \cap R_{\mu_{\max-i}}, i = 1, \dots, 5$

Блок выдачи выходного воздействия.

Как правило, в данном блоке реализуются алгоритмы дефазификации и на выходе формируется решение. Для повышения качества функционирования системы мониторинга состава атмосферного воздуха в диссертационной работе предлагается расширить блок путём включение в процесс принятия решений реальных моментальных данных об уровне загрязнения исследуемого атмосферного воздуха. Для этого предлагается использовать блок оценки текущего состояния атмосферного воздуха. В предлагаемом блоке входные концентрации вредных и опасных веществ преобразуются в нечеткое множество с помощью лингвистической переменной $Y < \text{«Средний уровень загрязнения»}, T_y, [0, 1] >$ путём вычисления среднего уровня загрязнения R_{cp} :

$$R_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{c_i}{\mu_{dk_i}}}{n}$$

В результате на вход блока принятия решений поступают два нечетких множества R_i и R_0 из блока формирования прогноза и из блока оценки текущего состояния атмосферного воздуха соответственно [8]. На данном этапе для формирования рекомендаций по улучшению качества атмосферного воздуха реализуется набор нечетких правил:

$$IF R_0 = A \text{ AND } R_i = B \text{ THEN } Z = N_j.$$

База правил для реализации процесса принятия решений формируется на основе имитационной модели, в которой реализовано моделирование крупного дорожного перекрестка города. Для получения необходимых данных проведен ряд исследований по воздействию и возможным последствиям тех или иных управляющих

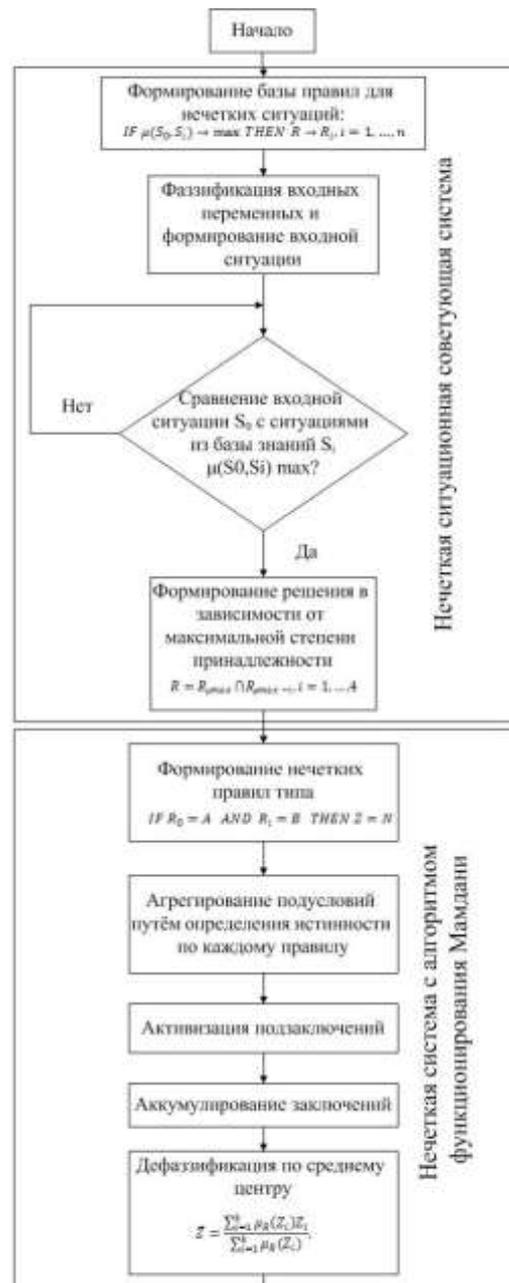


Рисунок 2 - Структура системы принятия решений

рекомендаций по улучшению качества атмосферного воздуха, загрязненного от автотранспортной среды. Для этого сравнивались значения среднего уровня загрязнения в текущей ситуации и после введения мероприятий, влияющих на уровень загрязнения (например, изменение алгоритма работы светофора).

Результаты и их обсуждение

В результате, для определения эффективности предлагаемого подхода использован метод непосредственной оценки для определения групп управляющих воздействий и проведено ранжирование мероприятий по степени их эффективности на экологическое состояние развивающихся городских территорий [9].

В итоге, структура системы принятия решений состоит из двух нечетких моделей (рисунок 2):

- нечеткая ситуационная система представляется собой нечеткую модель управления «ситуация-действие». После формирования базы правил и базы знаний формируется нечеткое входное множество (фаззификация), обозначаемое исходной или текущей ситуацией. После, текущая ситуация сравнивается с ситуациями из базы знаний и определяется наибольшая степень равенства ситуаций. После определения максимальной степени равенства выбирается второе значение из базы знаний (нечеткое множество «уровень загрязнения»), которое является входными данными для нечеткой системы.

- нечеткая система реализует классический алгоритм Мамдани за исключение блока фаззификации, так как на вход поступает уже нечеткое множество.

На основе предложенных моделей был реализован программный комплекс, в котором производится расчет канцерогенного и неканцерогенного рисков от загрязнения атмосферного воздуха вредными и опасными веществами. В программном комплексе реализован графический модуль формирования прогнозных значений для пользователя, а также с возможностью сохранения в базу данных для дальнейшей обработки.

Полученная эффективность мероприятий для управления качеством атмосферного воздуха в условиях развивающихся городских территорий, обеспечивающих снижение концентрации загрязняющих веществ в атмосфере, были смоделированы и протестированы в среде имитационного моделирования (таблица 1) [10].

Таблица 1 - Сравнительная оценка эффективности управляющих воздействий

Мероприятие	Эффективность на основе экспертных оценок, %	Эффективность на основе имитационной модели, %	Управляемый параметр модели
Строительство подземного пешеходного перехода	60...90	80	Интенсивность движения
Переход на гибридные легковые автомобили	30...65	45	Величина пробегового выброса
Реконструкция перекрестка с организацией	30...45	35	Интенсивность движения

кругового движения (радиус 60 метров)			
Строительство объездной дороги	5...30	25	Интенсивность движения

Заключение

Задача уменьшения концентраций вредных и опасных веществ в атмосферном воздухе города является актуальной и требует постоянного мониторинга и управления. Предложенные в статье модели могут найти применения при принятии управленческих решений на основе экологического мониторинга в условиях развития городских территорий. Разработанная система поддержки принятия решений в условиях развития городских территорий включает конечное ранжирование набора рекомендаций по снижению концентраций вредных и опасных веществ в городских узлах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Якушев А.Б., Куролап С.А., Карпович М.А. *Экологическая оценка воздействия автотранспорта на воздушный бассейн городов Центрального Черноземья*. 2013.
2. Информационно-статистический бюллетень «Транспорт России» январь-сентябрь 2019 года, <https://www.mintrans.ru/file/439532>.
3. Мелихова З.А., Мелихова О.А. Использование аппарата нечеткой математики при моделировании систем поддержки принятия решений. *Известия Южного федерального университета. Технические науки*. 2012;132(7).
4. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. *Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы*. – Горячая линия–Телеком, 2013.
5. Ярушкина Н. Г. *Основы теории нечетких и гибридных систем*. – М.: Финансы и статистика, 2004.
6. Казьмина И.Г., Гусев К.Ю., Усков В. М. Алгоритм классификации пространственных данных о состоянии загрязнения атмосферного воздуха. *Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций*. 2016;1(1(7)).
7. Казьмина И.Г., Усков В.М. Регрессионное моделирование содержания загрязняющих веществ в атмосферном воздухе. *Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций*. 2015;1(1(6)).
8. Иванова И.Г., Данилов А.Д., Гусев К.Ю. Интеллектуализация поддержки принятия решений в системах непрерывного мониторинга состава атмосферного воздуха. *Перспективные научные разработки*. 2019.
9. Верзилин Д.Н. *Эконометрика. Принятие управленческих решений на основе статистических данных*: учебное пособие. 2008.
10. Недре А.Ю., Азаров В.Н., Недре Ю.А. Использование сводных расчетов уровней загрязнения атмосферы при выборе градостроительных решений в рамках оптимизации городской транспортной схемы. *Интернет-Вестник ВолгГАСУ*. 2012;(2).

REFERENCES

1. Yakushev A.B., Kurolap S.A., Karpovich M.A. *Ecological assessment of the impact of motor transport on the air basin of the cities of the Central Chernozem region*. 2013.
2. Information and statistical Bulletin "Transport of Russia" January-September 2019, <https://www.mintrans.ru/file/439532>.
3. Melikhova Z.A., Melikhova, O.A. the Use of fuzzy mathematics for modeling systems of support of acceptance of decisions. *News of Southern Federal University. Technical Science*. 2012;132(7).
4. Rutkovskaya D., Pilinsky M., Rutkovsky L. *Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems*. Hotline-Telecom, 2013.
5. Yarushkina N. G. *Fundamentals of the theory of fuzzy and hybrid systems*. Moscow: Finance and statistics, 2004.
6. Kazmina I.G., Gusev K.Y., Uskov V.M. Algorithm for classification of spatial data on the state of atmospheric air pollution. *Modern technologies for civil defense and emergency response*. 2016;1(1(7)).
7. Kazmina I.G., Uskov V.M. Regression modeling of the content of pollutants in atmospheric air. *Modern technologies for civil defense and emergency response*. 2015;1(1(6)).
8. Ivanova I.G., Danilov A.D., Gusev K.Yu. Intellectualization of decision support in systems of continuous monitoring of atmospheric air composition. *Perspective scientific developments*. 2019.
9. Verzhilin D.N. *Econometrica. Making management decisions based on statistical data: a tutorial*. 2008.
10. Nedre A.Y., Azarov V.N., Nedre Y.A. Use of summary calculations of atmospheric pollution levels when choosing urban planning solutions in the framework of optimization of the city transport scheme. *Internet-Vestnik VolgGASU*. 2012;(2).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Иванова Инна Германовна, аспирант, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Российская Федерация.
e-mail: kazminaig@yandex.ru

Inna G. Ivanova, Post Graduate Student, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation.

Данилов Александр Дмитриевич, д.т.н., профессор, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Российская Федерация.
e-mail: danilov-ad@yandex.ru

Alexander D. Danilov, Doctor Of Technical Sciences , Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation.

Гусев Константин Юрьевич, к.т.н., Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Российская Федерация.
e-mail: gussev_konstantin@mail.ru

Konstantin Y. Gusev, Ph. D., Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation