

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.152.34>

**ПРОФИЛИРОВАНИЕ АГЕНТОВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ МУЛЬТИАГЕНТНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
ГОРОДОМ**

Научная статья

Бондаренко И.Б.¹, Пелих Д.А.^{2,*}, Раковский О.В.³

¹ ORCID : 0000-0001-9857-7200;

² ORCID : 0009-0001-6919-4822;

³ ORCID : 0009-0004-5226-8794;

^{1,2,3} Санкт-Петербургский государственный университет Телекоммуникаций им. профессора М. А. Бонч-Бруевича,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (elektronstandart[at]bk.ru)

Аннотация

Описаны проблемы управления городскими ресурсами. Обосновано применение мультиагентного подхода при решении задач в данной области. Приведена архитектура агента. Исследованы методы и принципы проектирования мультиагентных систем, рассмотрены основные алгоритмы работы. Приведен математический аппарат, необходимый для описания и функционирования агента. Описаны компоненты функции цели. Рассмотрены модели коллективного поведения агентов. Проведена архитектура комплекса мультиагентных систем в решении частных задач городского управления. Описаны возможности объединения этих систем. Представлен принцип работы локальной мультиагентной системы, решающей частные задачи городского управления. Сформирована процедура достижения глобальной цели агента-координатора. Приведены выводы исследования и описаны преимущества использования мультиагентного подхода.

Ключевые слова: профилирование, мультиагентные системы, управление ресурсами.

AGENT PROFILING IN THE DEVELOPMENT OF A MULTI-AGENT URBAN MANAGEMENT SYSTEM

Research article

Bondarenko I.B.¹, Pelikh D.A.^{2,*}, Rakovskii O.³

¹ ORCID : 0000-0001-9857-7200;

² ORCID : 0009-0001-6919-4822;

³ ORCID : 0009-0004-5226-8794;

^{1,2,3} St. Petersburg State University of Telecommunications named after Professor M. A. Bonch-Bruevich, Saint-Petersburg,
Russian Federation

* Corresponding author (elektronstandart[at]bk.ru)

Abstract

The problems of urban resource management are described. The application of multi-agent approach in solving problems in this area is substantiated. The architecture of the agent is given. Methods and principles of designing multi-agent systems are studied, basic algorithms of work are discussed. The mathematical apparatus necessary for description and functioning of the agent is presented. The components of the goal function are described. Models of collective behaviour of agents are reviewed. The architecture of the complex of multi-agent systems in solving private problems of urban management is carried out. Possibilities of combining these systems are described. The principle of operation of a local multi-agent system solving private tasks of urban management is presented. The procedure of achieving the global goal of the coordinator agent is formed. The conclusions of the research are given and the advantages of using the multi-agent approach are outlined.

Keywords: profiling, multi-agent systems, resource management.

Введение

Городское планирование является сложной многообъектной и многопараметрической задачей [1]. Это обусловлено множественными факторами, постоянно влияющими на состояние объектов управления, что позволяет им изменяться во времени, усложняя процедуры распределения ресурсов, что, в свою очередь, влияет на качество жизни горожан. Поэтому оперативность принятия решений и адаптивность к изменяющимся параметрам являются необходимыми качествами подобных систем [2], [3].

Также усложняет проектирование и государственный аппарат учреждений федерального, муниципального и регионального уровня, принимающих решения на основе ограниченного объема данных с планируемым эффектом в ближайшей перспективе. Еще одной проблемой является субъективизм принимаемых решений, а также отсутствие общего органа управления, осуществляющего кроме выработки решений еще и их оптимизацию.

И, наконец, на разных уровнях могут решаться лишь узкие задачи, направленные на развитие одного из направлений городского хозяйства, хотя при этом и не исключаются повторы поставленных задач. Поэтому решение перечисленных проблем является актуальной задачей данной статьи.

Методы и принципы проектирования мультиагентных систем

Для управления городскими ресурсами в работе предлагается использовать мультиагентную систему, принципы организации которой изложены в [4], [5]. Агент – программная или программно-аппаратная сущность, которая исполняет команды от управляющего центра, воспринимая текущие условия внешней среды, и оказывает на нее влияние. В литературе отмечается, что большое количество атрибутов и видов агентов, сложность принципов организации мультиагентных систем, – все это приводит к отсутствию строгого описания и выработки общей теории, что препятствует их развитию.

Управление множеством агентов осуществляет агент-координатор. В сложных мультиагентных системах связи образуют многоуровневую иерархическую систему, а взаимосвязь между уровнями осуществляют агенты-координаторы, которые управляют агентами-исполнителями.

Пусть каждый агент имеет унифицированную архитектуру, представленную на рисунке 1. Надо отметить, что в литературных источниках входная информация и вырабатываемые агентом действия часто интерпретируются как входящие и исходящие сообщения (соответственно), а функционирование агента в этом случае близко к работе сервиса или бота.



Рисунок 1 - Архитектура агента
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.152.34.1>

Агенты состоят из связки архитектура-алгоритм. В [6] представлена архитектура подобной системы и приведён возможный метод анализа эффективности последовательности действий агентов.

Рассмотрим кратко работу агентов, опираясь на основные виды алгоритмов:

- простые рефлексные;
- рефлексные, основанные на модели;
- агенты, действующие на основании цели;
- агенты, действующие на основании полезности;
- интеллектуальные агенты.

1. Алгоритм работы простых рефлексных агентов соответствует схеме «условие-действие» с абстрагированием от выработанных ранее решений, и, поэтому, обладают низким интеллектом, но вместе с тем самой простой. Недостатками алгоритма являются возможное: неправильное восприятие состояний внешней среды, зависание из-за ситуаций неопределенности, а также неспособность к обучению.

2. Принятие решений рефлексных агентов, основанных на модели, уже учитывает как текущее состояние внешней среды, так и изменения ее во времени из-за действий всех агентов системы. При этом к схеме «условие-действие» добавляется оценки внешней среды.

3. Алгоритм работы агента, действующего на основании цели, схож с предыдущим. Но вместо схемы «условие-действие» работа агента нацелена на выполнение цели C .

4. Показатель полезности позволяет оценить, насколько решение удовлетворяет множеству целей C , поставленных перед агентом (вместо стратегии определения выполнимости локальной цели C). В случае многовариантности и противоречивости целей оптимум функции полезности $Q(X)$ является целевым показателем взвешенного решения поставленной задачи с заданной точностью, полученного поисковым агентом:

$$N_{\text{opt}} \rightarrow \text{extr}(Q(X)) = \sum_{i=1}^p (C_i w_i) * \prod_{j=1}^l (\mu_j \varphi_j),$$

$$Q(X) = (x_1, x_2, \dots, x_n),$$

$$\sum w_i = 1.$$

где $\mu_j \varphi_j$ – штрафная функция j -го ограничения φ_j (μ_j принимает значения 0 или 1 в зависимости от нарушения или выполнения ограничения соответственно);

w_i – важность i -й цели C_i для всей мультиагентной системы;

p – мощность множества целей;

l – мощность множества ограничений.

5. Интеллектуальных агентов в зависимости от сложности мультиагентной системы наделяют множеством свойств: автономностью, коммуникабельностью, реактивностью, знаниями, убеждениями, желаниями, намерениями,

целями, обязательствами, мобильностью, благожелательностью, правдивостью, рациональностью и так далее. В данной работе ограничимся свойствами реактивности, знания и цели, а основой интеллектуальных агентов будем считать обучающийся компонент, который, несомненно, усложняет алгоритм его работы. При этом организуется обратная связь, с помощью которой, посредством элемента критика и генератора проблем, производится выработка решений агентом. Таким образом, такой агент использует знания, накопленные на предыдущих шагах работы, и имеет возможность работы в условиях неопределенности, касающихся, например, состояния внешней среды, или отсутствие информации от других агентов.

Для профилирования агента используем следующий набор элементов, необходимых для его описания и функционирования.

Опишем агента-исполнителя как кортеж:

$$N = \{D_{\text{вх}}, D_{\text{исх}}, A, L, B, W, \dots\},$$

где $D_{\text{вх}}$ – множество входящих сообщений относительно рассматриваемого агента;

$D_{\text{исх}}$ – множество исходящих сообщений;

A – множество архитектур агентов;

L – множество программ работы агента;

B – множество заданий для агента;

W – эффективность работы агента.

Работу мультиагентной системы будем представлять как итерационный процесс, при этом оценку эффективности работы агента на j -м шаге W^j будет выражать кортеж:

$$W^j = \{U_i^j, V_i^j, Z_i^j, S_i^j\}, i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, k,$$

где U_i^j – успех i -го агента на j -м шаге поиска;

V_i^j – достигнутый результат i -го агента;

Z_i^j – затраты агента на поиск;

S_i^j – перспектива дальнейшего участия агента в поиске;

n – количество агентов;

k – количество шагов поиска.

Агент-координатор оптимизирует глобальную функцию цели G , тогда как локальную цель G_{ij} пытается достичь агент-исполнитель на каждой из j -х подсистем i -го уровня. Опишем цель G_{ij} наборами, состоящими из параметров:

$$G_{\text{опт}} = \text{extr}(F(G_{ij})), G_{ij} = F(C, S, R, Y, F(S, Y)),$$

причем:

$$F(S, Y) \rightarrow R, F(X, Y),$$

где: S – множество средств для достижения глобальной цели C алгоритма подсистемы мультиагентной системы; R – множество полученных результатов на уровне подсистемы; Y – множество состояний внешней среды; X – множество внутренних параметров системы; $F(S, Y)$ – оператор связи средств и состояний внешней среды.

Представим достигнутый результат i -го агента на j -м шаге поиска оптимума n -мерной функции $Q(X) = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ как:

$$V_i^j = \text{extr}(Q_i^j(X)),$$

т.е. достигнутое экстремальное значение на данном шаге.

Достигнутый успех для i -го агента определяется как:

$$U_i^j = |Q_i^{j-1}(X) - Q_i^j(X)|,$$

а затраты на поиск Z_i^j могут определяться в единицах времени или в условных единицах.

Перспектива дальнейшего участия i -го агента в поиске будет прямо пропорциональна U_i^j и обратно пропорциональна Z_i^j .

Для создания мультиагентной системы, реализующей интеллектуальные методы, требуются разнообразные агенты: агенты-менеджеры, агенты-механизмы, агенты-координаторы, поисковые агенты, обучающиеся агенты, принимающие решения.

Для создания сообществ агентов необходимо определить:

- структуры представления информации;
- стратегии поиска из альтернативных решений (разрешение конфликтов);
- модель коллективного поведения агентов.

Описание общей архитектуры комплекса систем управления городом

Однако для решения всего комплекса городских задач одной мультиагентной системы будет недостаточно. Ввиду большого количества объектов управления и разрозненности сфер, в которых они находятся проектирование общей мультиагентной системы управления городом является не целесообразным. Предлагается её декомпозиция на комплекс систем, решающих частные задачи городского регулирования, который впоследствии может быть объединён в единую структуру посредством организации миграции данных между компонентами. Пример архитектуры такого комплекса приведён на рисунке 2.

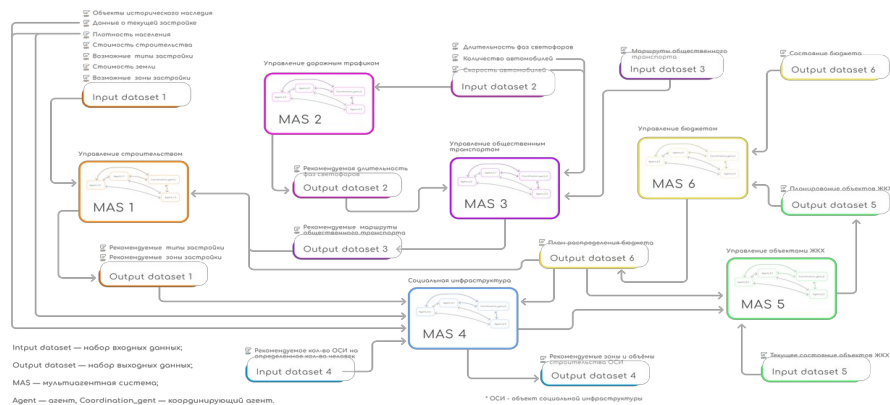


Рисунок 2 - Архитектура комплекса мультиагентных систем управления городом
 DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.152.34.2>

Прямоугольными блоками обозначены мультиагентные системы, решающие частные задачи городского управления, они получают на вход набор данных (input dataset) в табличном формате, характеризующий объекты управления, а результатом их работы является набор данных, описывающий оптимальное распределение ресурсов (output dataset). Причём объединение этих систем осуществляется за счёт использования ими выходных или общих входных данных.

Функционирование локальной мультиагентной системы

Далее рассмотрен процесс работы локальной мультиагентной системы (рисунок 3).

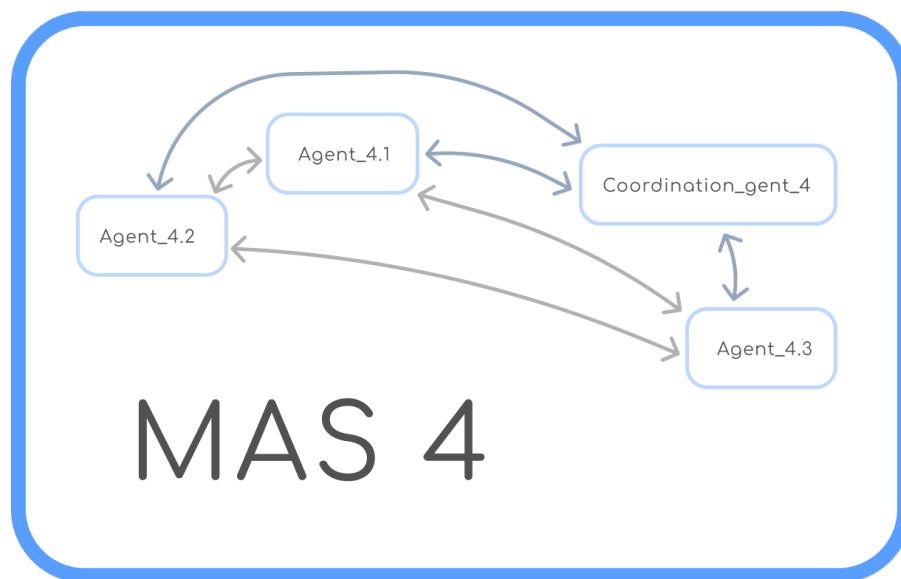


Рисунок 3 - Концептуальная схема мультиагентной системы
 DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.152.34.3>

Она включает в себя набор агентов с определёнными локальными целями и входными значениями управляемых параметров. Агенты обмениваются сообщениями о вариантах изменения значений параметров, а результатом их работы является оптимальный план распределения ресурсов. Применение такого подхода призвано сделать процесс нахождения оптимума более гибким и настраиваемым, а также снизить нагрузку на аппаратную часть. Другие преимущества мультиагентного метода описаны в [7], [8].

Так же в схеме присутствует координирующий агент, призванный оценить вклад каждого агента в работу системы и задать уровень его влияния на итоговый результат. Процедура достижения глобальной цели G агента-координатора является основой при разработке мультиагентной системы и может строиться на основе одной из моделей коллективного поведения агентов. Причем такая модель кооперации строится с учетом используемых архитектур агентов.

При разработке модели коллективного поведения агентов для решения конкретной задачи строится на основе:

- теории коллективного поведения независимых автоматов;
- теории игр;
- распределенного искусственного интеллекта;

- законов функционирования биологических систем;
- экономических закономерностей;
- социальных законов.

Наиболее простой в реализации является модель аукциона [9], которая не предполагает процесс анализа состояний внешней среды, а агенты двух типов взаимодействуют друг с другом (торговля) для достижения локальных целей (покупка/продажа товара), при этом достигнутый результат на определенном шаге является конечным (сделка). Такие связи между компонентами системы на рисунке 3 представлены стрелками.

Агент-координатор производит последовательный опрос сначала со стороны покупателей, а затем со стороны продавцов на предмет заключения сделки. Если цена оказывается подходящей, то сделка совершается.

Внешней средой выступает конъюнктура рынка, которая динамично изменяется в зависимости от наличия успешных сделок, времени торговли, трендов и т.п.

В качестве ограничений выступают: время и ресурсы, а цели – продажа товаров по максимальной цене и покупка по минимальной.

Такой вид координации подходит для моделирования работы на уровне магазинов, предприятий (в задачах распределения работ среди персонала) и т.п. Для задач такого вида подходят агенты первого и второго типов. В [5] представлен пример системы контроля производственных ресурсов, реализованный на основе мультиагентного подхода, среди других работ данных авторов имеется описание применения подобных решений и для других сфер управления. А в [7] рассматривается проблема перемещения морских судов.

Для организации агентов в более сложных задачах, например, систем принятия решений для оценки деятельности предприятия с участием экспертов, необходимо уже использование методов: анализа иерархий, попарного сравнения альтернатив с целью их ранжирования, согласования оценок экспертов, так как процесс в данном случае является многокритериальным и многостадийным. Усложняется работа и агента-координатора в связи с тем, что необходимо управлять разнородными агентами, решающими разные задачи и на разных стадиях. Помимо агентов-исполнителей, в этом случае будут присутствовать: агенты-координаторы, агенты-эксперты и управляющий агент. Отметим, что в данной задаче процесс принятия решений в динамике будет развиваться, не исходя из изменений внешней среды, а в зависимости от готовности данных, достаточных для перехода на следующую стадию алгоритма.

Заключение

Применение мультиагентных систем в процессе городского управления призвано повысить эффективность работы государственных органов посредством выработки оптимальных решений, полученных в ходе кооперации агентов. Агент вырабатывает решения, исходя из свойств среды, т.е. адаптивен, что позволяет системе быстро реагировать на любые изменения и принимать решения и учётом заданных оператором ограничений. Текущие системы городского управления направлены как правило на сбор, хранение и обработку данных, описывающих объекты управления, а предлагаемое решение направлено на поддержку принятия решений в данной области. Такой подход при этом является достаточно универсальным и может использоваться для решения частных утилитарных задач, таких как, например, управление дорожным трафиком [10] или прогнозирование пассажиропотока [11].

Разработанный профиль может служить базисом для подсистем мультиагентной системы управления разными видами ресурсов города. Это позволяет достичь унификации и взаимозаменяемости агентов при разработке разноплановых систем управления. В дальнейших работах авторы предполагают подробно изложить процесс разработки подобных систем как со стороны проектирования архитектуры, так и со стороны подготовки математического аппарата и программной реализации.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Рудой Е.М., АО "Сбербанк-Технологии", Королёв, Российская Федерация
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.152.34.4>

Review

Rudoi E.M., Sberbank Technologies JSC, Korolev, Russian Federation
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.152.34.4>

Список литературы / References

1. Роскош М.В. Город как система / М.В. Роскош // Научный диалог. — 2013. — № 12(24). — С. 48–57.
2. Бондаренко И.Б. Мультиагентное планирование в управлении городской инфраструктурой / И.Б. Бондаренко, Д.А. Пелих // Подготовка профессиональных кадров в магистратуре для цифровой экономики (ПКМ-2023) : Всероссийская научно-техническая и научно-методическая конференция магистрантов и их руководителей. — Санкт-Петербург : СПбГУТ, 2023. — С. 365–368.
3. Wang C. Consensus Problem and Formation Control for Heterogeneous Multi-Agent Systems with Switching Topologies / C. Wang, J. Wang, P. Wu [et al.] // Electronics. — 2022. — № 11. DOI: 10.3390/electronics11162598.
4. Маслобоев А.В. Модели и алгоритмы взаимодействия программных агентов в виртуальной бизнес-среде развития инноваций / А.В. Маслобоев // Вестник МГТУ. — 2009. — Т. 12, № 2. — С. 224–234.
5. Скобелев П.О. Адаптивное мультиагентное планирование производственных ресурсов на основе онтологии / П.О. Скобелев, О.И. Лахин, И.В. Майоров [и др.] // Информационно-управляющие системы. — 2018. — № 6. — С. 105–117. DOI: 10.31799/1684-8853-2018-6-105-117.

6. Bondarenko I.B. Designing the Architecture of a Multi-agent CityManagement System Using AdvancedObject-Oriented Modeling / I.B. Bondarenko, V.L. Litvinov, D.A. Pelikh [et al.] // Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Digital and Information Technologies in Economics and Management" (DITEM2023). — 2023. — № 21–23. — P. 106–117. DOI: 10.1007/978-3-031-55349-3_9.

7. Kumar A. Multiagent Decision Making and Learning in Urban Environments / A. Kumar. — Singapore : School of Information Systems, Singapore Management University, 2019. — P. 6398–6402. DOI: 10.24963/ijcai.2019/895.

8. Душкин Р.В. Многоагентные системы для кооперативных ИТС / Р.В. Душкин // Тренды и управление. — 2021. — № 1. — С. 42–50. DOI: 10.7256/2454-0730.2021.1.34169.

9. Рубцов А.А. Подход к процессу взаимного информационного согласования элементов систем доставки данных на основе аукционной модели / А.А. Рубцов // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. — 2024. — № 12. — С. 1–10. DOI: 10.26102/2310-6018/2024.46.3.009.

10. Li L. A survey of traffic control with vehicular communications / L. Li, W. Ding, Y. Danya // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. — 2014. — № 15. — P. 425–432. DOI: 10.1109/TITS.2013.2277737.

11. Jinxin Wu A Time Series Decomposition and Reinforcement Learning Ensemble Method for Short-Term Passenger Flow Prediction in Urban Rail Transit / Wu Jinxin, He Deqiang, Li Xianwang [et al.] // Springer. Urban Rail Transit. — 2023. — № 9. — P. 323–351. DOI: 10.1007/s40864-023-00205-1.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Roskosh M.V. Gorod kak sistema [The city as a system] / M.V. Roskosh // Nauchnyj dialog [Scientific Dialogue]. — 2013. — № 12(24). — P. 48–57. [in Russian]

2. Bondarenko I.B. Mul'tiagentnoe planirovanie v upravlenii gorodskoj infrastrukturoj [Multi-agent planning in urban infrastructure management] / I.B. Bondarenko, D.A. Pelih // Podgotovka professional'nyh kadrov v magistrature dlja cifrovoy jekonomiki (PKM-2023) [Training of professional staff in the Master's degree program for the digital economy (PCM-2023)] : All-Russian Scientific, Technical, Scientific and Methodological Conference of undergraduates and their supervisors. — Sankt-Peterburg : SPbGUT, 2023. — P. 365–368. [in Russian]

3. Wang C. Consensus Problem and Formation Control for Heterogeneous Multi-Agent Systems with Switching Topologies / C. Wang, J. Wang, P. Wu [et al.] // Electronics. — 2022. — № 11. DOI: 10.3390/electronics11162598.

4. Masloboev A.V. Modeli i algoritmy vzaimodejstviya programmnyh agentov v virtual'noj biznes-srede razvitija innovatsij [Models and algorithms of interaction of software agents in the virtual business environment of innovation development] / A.V. Masloboev // Vestnik MGTU [Bulletin of the Moscow State Technical University]. — 2009. — Vol. 12, № 2. — P. 224–234. [in Russian]

5. Skobelev P.O. Adaptivnoe mul'tiagentnoe planirovanie proizvodstvennyh resursov na osnove ontologii [Adaptive multi-agent planning of industrial resources based on ontology] / P.O. Skobelev, O.I. Lahin, I.V. Majorov [et al.] // Informatsionno-upravliaiushchie sistemy [Information and Control Systems]. — 2018. — № 6. — P. 105–117. DOI: 10.31799/1684-8853-2018-6-105-117. [in Russian]

6. Bondarenko I.B. Designing the Architecture of a Multi-agent CityManagement System Using AdvancedObject-Oriented Modeling / I.B. Bondarenko, V.L. Litvinov, D.A. Pelikh [et al.] // Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Digital and Information Technologies in Economics and Management" (DITEM2023). — 2023. — № 21–23. — P. 106–117. DOI: 10.1007/978-3-031-55349-3_9.

7. Kumar A. Multiagent Decision Making and Learning in Urban Environments / A. Kumar. — Singapore : School of Information Systems, Singapore Management University, 2019. — P. 6398–6402. DOI: 10.24963/ijcai.2019/895.

8. Dushkin R.V. Mnogoagentnye sistemy dlja kooperativnyh ITS [Multi-agent systems for corporate ITS] / R.V. Dushkin // Trends and Management. — 2021. — № 1. — P. 42–50. DOI: 10.7256/2454-0730.2021.1.34169. [in Russian]

9. Rubtsov A.A. Podhod k protsessu vzaimnogo informatsionnogo soglasovanija elementov sistem dostavki dannyh na osnove auktsionnoj modeli [An approach to the process of mutual information coordination of elements of data delivery systems based on the auction model] / A.A. Rubtsov // Modelirovanie, optimizacija i informacionnye tehnologii [Modeling, Optimization and Information Technology]. — 2024. — № 12. — P. 1–10. DOI: 10.26102/2310-6018/2024.46.3.009. [in Russian]

10. Li L. A survey of traffic control with vehicular communications / L. Li, W. Ding, Y. Danya // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. — 2014. — № 15. — P. 425–432. DOI: 10.1109/TITS.2013.2277737.

11. Jinxin Wu A Time Series Decomposition and Reinforcement Learning Ensemble Method for Short-Term Passenger Flow Prediction in Urban Rail Transit / Wu Jinxin, He Deqiang, Li Xianwang [et al.] // Springer. Urban Rail Transit. — 2023. — № 9. — P. 323–351. DOI: 10.1007/s40864-023-00205-1.