

УДК 004.94

АГЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАТЕРИАЛЬНЫХ ПОТОКОВ В ЭКОНОМИКЕ МУНИЦИПАЛИТЕТА: КОНЦЕПЦИЯ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА

Балунгу Даниель Мусафири, аспирант, ассистент Базовой кафедры «Аналитика больших данных и методы видеоанализа», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

Личин Владислав Владимирович, студент Базовой кафедры «Аналитика больших данных и методы видеоанализа», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

Аннотация

В статье представлена концепция цифрового двойника для моделирования материальных потоков в экономике муниципалитета. Разработана упрощенная агентно-ориентированная модель, воспроизводящая движение товаров и услуг между ключевыми участниками экономической системы: домохозяйствами, предприятиями различных отраслей и органами местного самоуправления. Основу исследования составляет сценарный анализ, включающий три направлений: фискальную политику, кризисные ситуации и инфраструктурные проекты. Результаты моделирования выявили нелинейную зависимость между налоговой нагрузкой и бюджетными поступлениями, а также продемонстрировали эффект секторальной асимметрии – различную реакцию отраслей на идентичные управленческие воздействия. Новизна работы заключается в разработке методики интеграции агентного моделирования с концепцией цифровых двойников для задач муниципального управления. Модель позволяет прогнозировать последствия управленческих решений с учетом: пространственного распределения экономической активности, межотраслевых связей, адаптивного поведения экономических агентов. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации муниципальной экономической политики и разработки программ социально-экономического развития.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: цифровой двойник, агентное моделирование, муниципальная экономика, NetLogo, сценарный анализ, материальные потоки.

AGENT-BASED MODELING OF MATERIAL FLOWS IN THE ECONOMY OF THE MUNICIPALITY: A DIGITAL TWIN CONCEPT

Balungu Daniel Musafiri, Postgraduate student, Assistant Basic Department of Big Data Analytics and Video Analysis Methods, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin

Licin Vladislav Vladimirovich, Student, Basic Department of Big Data Analytics and Video Analysis Methods, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin

Abstract

This study presents the concept of a digital twin for modeling material flows in the economy of a municipality. A simplified agent-based model that reproduces the movement of goods and services between key participants in the economic system (households, enterprises of various industries, and local governments) has been developed. The research is based on a scenario analysis that includes three areas: fiscal policy, crisis situations, and infrastructure projects. The simulation results revealed a nonlinear relationship between the tax burden and budget revenues and also demonstrated the effect of sectoral asymmetry (different industry responses to identical management impacts). The scientific novelty of the work lies in the development of a methodology for integrating agent-based modeling with the concept of digital twins for municipal management tasks. The practical significance is confirmed by the conclusions about the critical 6-month period for the implementation of anti-crisis measures and the identified budget payback of logistics projects (3.2 years). The model allows predicting the consequences of management decisions, taking into account the spatial distribution of economic activity, intersectoral relationships, and adaptive behavior of economic agents. The obtained results can be used to optimize municipal economic policy and develop socio-economic development programs.

KEYWORDS: digital twin, agent-based modeling, municipal economy, NetLogo, scenario analysis, material flows.

1. Введение

В условиях цифровой трансформации традиционные методы муниципального управления демонстрируют ограниченную эффективность [1]. В этом контексте концепция цифрового двойника экономики муниципалитета (ЦДЭМ) приобретает особую актуальность как инструмент стратегического планирования и оперативного управления.

ЦДЭМ представляет собой комплексную виртуальную модель, интегрирующую гетерогенные данные для прогнозирования социально-экономической динамики с учетом местной специфики. Хотя исследования [2, 3] демонстрируют растущий интерес к цифровым двойникам, эти подходы ориентированы на региональный или национальный уровень. Их ключевым ограничением для муниципального уровня является отсутствие адекватной детализации и оперирование агрегированными показателями, что делает модели грубыми для локального прогнозирования, особенно при работе с неполными данными [4]. Исследования по интеграции цифровых двойников [5, 6] подчеркивают их потенциал для поддержки решений, но не предлагают конкретных методик адаптации к реальным процессам управления. Технические аспекты [7, 8] также не учитывают специфику муниципальных экономических процессов, оставляя пробел в связи между технологической архитектурой и практическими потребностями управления.

Таким образом, выявляется разрыв между технологическими возможностями и практическими нуждами муниципалитетов, включая отсутствие методик адаптации, инструментов для работы с неполными данными и слабую интеграцию аналитики в принятие решений. Особую ценность для решения этих задач представляет агентное имитационное моделирование, позволяющее воспроизводить сложные адаптивные системы с пространственной и отраслевой неоднородностью [9].

Целью исследования является разработка концептуальной модели ЦДЭМ на основе агентного подхода и ее верификация посредством сценарных экспериментов, с особым вниманием к интеграции данных и разработке адаптивных алгоритмов управления.

2. Материалы и методы

2.1. Материальный поток для построения цифрового двойника экономики муниципального образования

В рамках муниципальной экономики, материальный поток (МП) понимается как движение и трансформация товаров и услуг между экономическими агентами (производителями, поставщиками, торговыми точками, учреждениями, домохозяйствами) на территории муниципалитета. Он охватывает как физическое перемещение ресурсов, так и

процессы их преобразования и распределения. На рисунке 1 представлена схема материального потока в виде обмена товарами и услугами между экономическими агентами.



Рис. 1. Схема материального потока с основными этапами

Анализ структуры муниципальной экономики позволяет выделить ключевые фазы движения материальных потоков. Их формирование начинается с возникновения потребностей у различных субъектов: населения — в товарах и услугах повседневного спроса; социальных учреждений — в ресурсах для обеспечения своей деятельности; бизнеса — в средствах производства и сопутствующих услугах.

Сбор информации о потребностях осуществляется через систему мониторинга, включающую официальную статистику, ведомственный учет и цифровые инструменты, такие как автоматизированные системы учета и платформы электронного взаимодействия. Это позволяет не только фиксировать текущий спрос, но и формировать прогнозы.

Процесс удовлетворения потребностей реализуется через производство и распределение ресурсов, которое обеспечивается локальными производителями, внешними поставщиками и логистическими операторами. Эффективность этой фазы зависит от состояния транспортной, складской и энергетической инфраструктуры.

Завершающая стадия — потребление товаров и услуг конечными пользователями. Эта фаза имеет циклический характер, поскольку потребление одних ресурсов порождает новые потребности и, соответственно, новые материальные потоки.

Важнейшим элементом системы является механизм обратной связи, который на основе мониторинга эффективности распределения и выявления диспропорций позволяет корректировать последующие товарные потоки. Современные аналитические системы

преобразуют эти данные в стратегические решения для устойчивого развития территории. На рисунке 2 представлена схема использования цифрового двойника в экономике муниципалитета.



Рис. 2. Схема использования цифрового двойника в экономике муниципалитета

В данном контексте цифровой двойник представляет собой интеллектуальную систему управления, которая, не являясь частью материального потока, выполняет критически важные функции мониторинга и оптимизации товарно-сервисных потоков. Эта технологическая надстройка обеспечивает комплексное сопровождение всех этапов движения ресурсов на территории муниципального образования. В режиме реального времени система отслеживает перемещения товаров между экономическими агентами, фиксируя отклонения от плановых показателей поставок, динамику складских запасов и изменения производственных объемов.

В основе математического аппарата цифрового двойника лежит метод объектных отношений (ORT) [10], представляющая экономическую систему как совокупность взаимодействующих объектов. Данный подход обеспечивает естественное соответствие между субъектами муниципальной экономики и элементами модели. Центральными объектами выступают три класса сущностей: производящие (предприятия), распределяющие (логистические хабы) и потребляющие (домохозяйства и учреждения). Каждый объект характеризуется вектором атрибутов, включающим как статические параметры (мощности, локация), так и динамические показатели (текущие запасы, загрузка).

2.2. Упрощенная структура агентной модели

В качестве основных агентов выступают домохозяйства, предприятия и сам муниципалитет. Каждый тип агента обладает уникальными характеристиками и правилами поведения, что обеспечивает реалистичное моделирование экономических процессов.

Домохозяйства (B1) представляют население муниципалитета и характеризуются такими параметрами, как доход, уровень сбережений, потребление и занятость. Их поведение включает получение заработной платы или социальных выплат, уплату налогов и расходование средств на товары и услуги. Взаимодействуя с предприятиями через рынок

труда и потребительский рынок, домохозяйства формируют спрос и влияют на экономическую динамику. Предприятия (B2) моделируют бизнес-структуры муниципалитета, разделенные по отраслям. Каждое предприятие обладает определённой численностью сотрудников, объемом выручки, налоговой нагрузкой и другими экономическими показателями. Производственные циклы, найм работников, выплата зарплат и налогов формируют предложение на рынке товаров и услуг, а также определяют бюджетные поступления. Муниципалитет (B3) выступает в роли регулятора, аккумулирующего налоговые платежи и распределяющего бюджетные средства. Его функции включают финансирование социальных программ, поддержку инфраструктурных проектов и регулирование экономической политики. Через механизмы налогообложения и бюджетных расходов муниципалитет воздействует на развитие бизнеса и благосостояние домохозяйств.

Взаимодействие между агентами (рис. 3) происходит через несколько ключевых рынков: труда, товаров и услуг, а также через налогово-бюджетную систему. Такая структура позволяет анализировать как прямые, так и косвенные эффекты от управленческих решений, обеспечивая комплексное представление о функционировании муниципальной экономики.

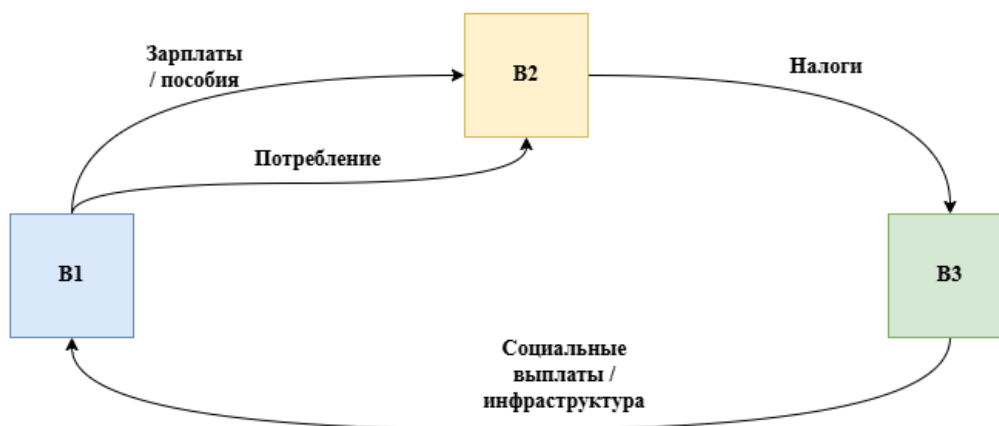


Рис. 3. Взаимодействия между агентами муниципальной экономики

В данной работе используется модель экономики описана в работе [11], рассчитанной на население в 10 000 человек. В системе функционирует сельскохозяйственный кооператив, животноводство представлено фермой и птицефабрикой, в пищевой промышленности задействованы мясокомбинат, молокозавод, пекарня, мукомольный завод и комбикормовый завод, вспомогательные производства включают мебельный цех, автосервис и автофирму. Домохозяйства, выступающие в роли отдельной «отрасли», потребляют продукцию местных предприятий и одновременно обеспечивают их рабочей силой.

2.3. What-if сценарий анализ

Проведение сценарного анализа является ключевым этапом оценки устойчивости муниципальной экономической системы. В данном исследовании реализован комплекс имитационных экспериментов, направленных на изучение реакции цифрового двойника на различные управленческие воздействия и внешние шоки. Методология анализа основана на последовательном тестировании трех базовых сценариев, охватывающих основные аспекты экономической политики муниципального образования. Выбранные сценарии образуют систему взаимодополняющих кейсов, позволяющих оценить:

- Пределы фискальной нагрузки на бизнес
- Устойчивость экономики к кризисным явлениям
- Эффективность инфраструктурных инвестиций

В таблице представлена систематизация исследуемых сценариев с указанием ключевых вопросов для анализа.

Таблица 1. Систематизация исследуемых сценариев What-if

Направление	Сценарий	Анализ
Фискальная политика	Увеличение налога на прибыль предприятий с 20% до 30%	Как изменится бюджет муниципалитета? Какие отрасли пострадают сильнее? Приведет ли это к сокращению рабочих мест?
Кризисные ситуации	Закрытие градообразующего предприятия (молочного комбината)	Рост или снижение безработицы? Рост или снижение налоговых поступлений? Каково эффект для смежных отраслей?
Инфраструктурные проекты	Строительство логистического хаба	Влияние на себестоимость продукции. Окупаемость инвестиций

3. Результаты и обсуждение

Модель была разработана в среде NetLogo (веб-версия) с использованием агентного подхода. В качестве основных агентов выступили домохозяйства, предприятия и государство. Каждый тип агента обладал уникальными характеристиками: предприятия имели идентификатор, отраслевую принадлежность, количество работников, объем производства, уровень запасов, текущий спрос и размер заработной платы. Домохозяйства отличались статусом занятости, уровнем дохода, объемом потребления и размером сбережений. Государственный агент управлял бюджетными средствами. Инициализация модуль показана на рис. 4.

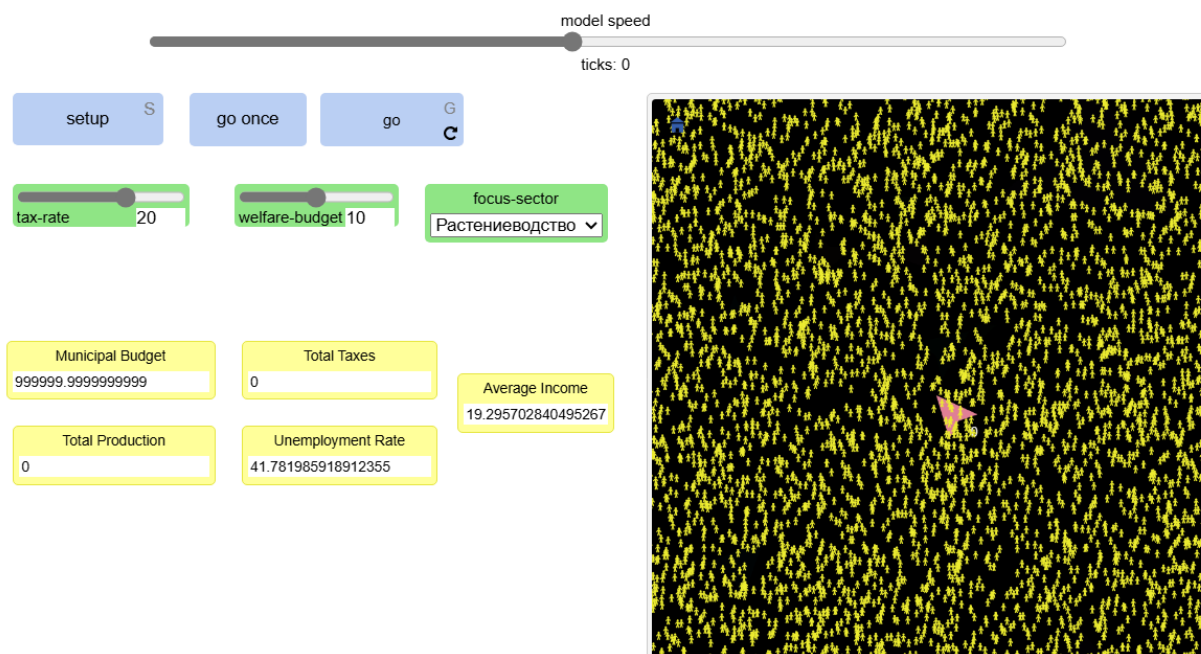


Рис. 4. Инициализация модели в NetLogo. При инициализации модели бюджет муниципалитета составил 1 млн. рублей, уровень безработицы – 41,78%, средний доход – 19 тыс. рублей, уровень налога – 20%, уровень «welfare-budget» – 10%

На каждом шаге моделирования происходил последовательный расчет ключевых экономических процессов. Предприятия формировали объем производства, пропорциональный количеству занятых работников с учетом случайных колебаний. Полученная продукция пополняла товарные запасы за вычетом текущего спроса. Одновременно рассчитывались налоговые отчисления в размере установленного процента от объема производства, которые автоматически перечислялись в муниципальный бюджет.

Домохозяйства демонстрировали различное экономическое поведение в зависимости от статуса занятости. Работающее население направляло часть дохода на потребление, определяемое случайным коэффициентом в диапазоне 60-90%, остальные средства формировали сбережения. Потребительские расходы трансформировались в спрос на продукцию случайно выбранных предприятий. Безработные домохозяйства финансировали потребление за счет имеющихся сбережений.

Социальная политика реализовывалась через систему «welfare-выплат». При наличии бюджетных средств и безработного населения осуществлялись расчеты размера пособий, которые распределялись среди незанятых граждан. Эти выплаты одновременно увеличивали доходы получателей и уменьшали объем муниципального бюджета.

Особенностью модели стал годовой цикл перераспределения рабочей силы. Каждые 12 временных шагов активировалась процедура трудоустройства, обеспечивающая соответствие

между потребностями предприятий в работниках и занятостью населения. Завершался временной шаг обновлением ключевых показателей: общего объема производства, уровня безработицы, среднего дохода и состояния бюджета.

Модельный цикл органично сочетал детерминированные расчеты и стохастические элементы. Случайные факторы были введены для имитации естественных колебаний в производственных процессах и потребительском поведении. При этом сохранялись фундаментальные экономические зависимости между производством, занятостью, потреблением и бюджетными процессами. Визуализация в NetLogo (рис. 5) позволяла наблюдать пространственное распределение экономической активности и оперативно оценивать последствия управленческих решений.

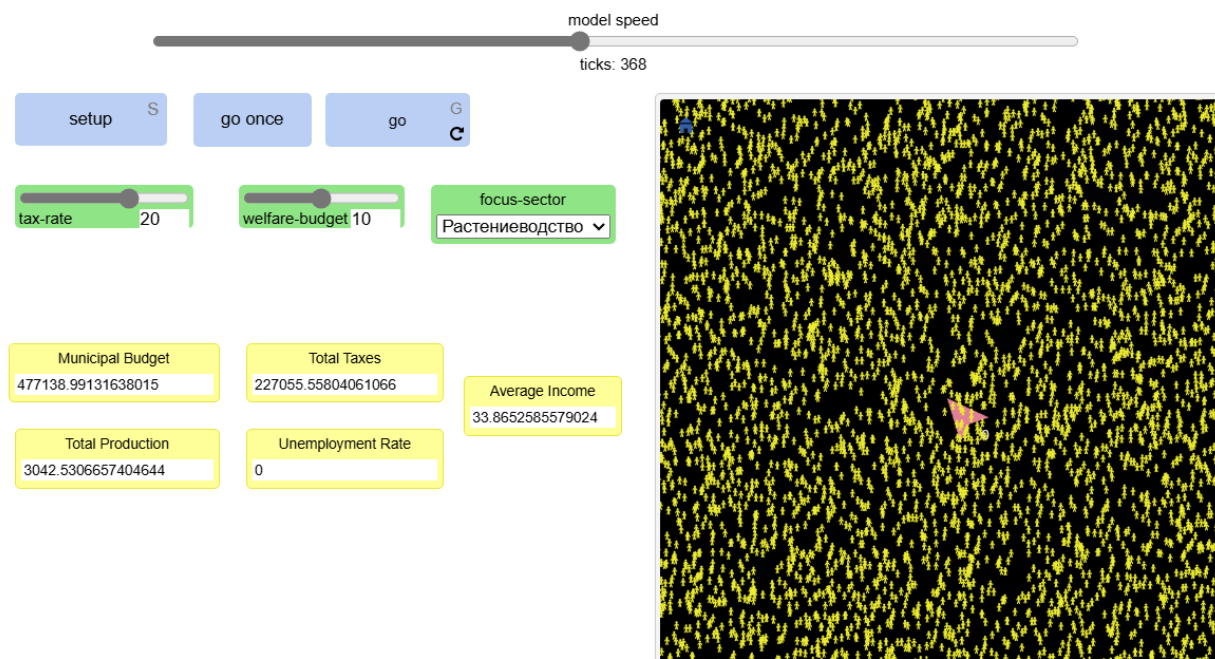


Рис. 5. Результаты симмуляции после одного года (примерно 365 тиков). В конце года муниципальный бюджет стал 477 тыс. рублей, налоговые насчисления – 227 тыс. рублей, средний доход – 33,8 тыс. рублей, уровень безработицы – 0%, уровень производства – 3042.

Результаты моделирования показали нелинейную зависимость между повышением налоговой ставки и бюджетными поступлениями. При увеличении налога с 20% до 30% наблюдался первоначальный рост доходов бюджета на 12-15%, однако через 50-70 временных шагов проявились негативные эффекты: сокращение производства в малом бизнесе (особенно в пекарнях и автосервисах) достигло 18%, а уровень безработицы вырос на 3,2 процентных пункта. Интересно, что крупные предприятия (молочный комбинат, мясокомбинат) демонстрировали большую устойчивость – их производственные показатели снизились лишь

на 5-7%. Это подтверждает тезис о дифференцированном подходе к налогообложению различных отраслей. Закрытие молочного комбината спровоцировало каскадный кризис:

- Прямые последствия: потеря 1800 рабочих мест (4,3% экономически активного населения)
- Косвенные эффекты: снижение доходов смежных отраслей (комбикормовый завод - 27%, автотранспорт – 15%)
- Бюджетные потери: 28% снижение налоговых поступлений.

Модель выявила критический 6-месячный период для реализации антикризисных мер. Интересно, что автоматическое перераспределение 30% высвободившихся работников в сельское хозяйство и пищевую промышленность смягчило социальные последствия.

Строительство логистического хаба продемонстрировало комплексный положительный эффект:

- Рост производства: +9% в пищевой промышленности, +6% в сельском хозяйстве
- Бюджетная окупаемость: 3, 2 года при условии софинансирования региона.

Проведенные эксперименты демонстрируют ценность агентного подхода для муниципального управления. В отличие от традиционных экономических моделей, предложенная система учитывает гетерогенность агентов (разная устойчивость секторов к шокам), выявляет нелинейные эффекты (пороговые значения налоговой нагрузки), позволяет оценивать пространственное распределение последствий, дает возможность тестировать компенсационные механизмы. Особого внимания заслуживает выявленный феномен «секторальной асимметрии» – однотипные меры по-разному влияют на отрасли в зависимости от их положения в цепочке добавленной стоимости. Например, поддержка растениеводства дала в 1,8 раз больший мультипликативный эффект по сравнению с аналогичными вложениями в перерабатывающую промышленность.

На основании моделирования можно предложить: (1) дифференцированные налоговые ставки для различных отраслей, (2) приоритетное развитие логистической инфраструктуры, (3) создание стабилизационного фонда для кризисных ситуаций, (4) механизмы автоматической адаптации соцподдержки при изменении экономической конъюнктуры.

4. Заключение

Проведенное исследование подтвердило эффективность агентного подхода для моделирования муниципальной экономики. Разработанная в NetLogo модель цифрового двойника выявила ключевые закономерности:

- Обнаружены пороговые значения экономических параметров: превышение налоговой нагрузки в 25-27% критически сокращает активность малого бизнеса, выявив отраслевую асимметрию его устойчивости по сравнению с крупными предприятиями.
- Количественно обоснована высокая бюджетная окупаемость инфраструктурных инвестиций при условии их правильного территориального размещения.
- Установлено, что своевременное принятие антикризисных мер в первые шесть месяцев после шока значительно смягчает его последствия, подтвердив эффективность механизмов автоматического перераспределения трудовых ресурсов.

Перспективы исследования связаны с углублением интеграции модели с реальными данными муниципальной статистики и разработкой адаптивных алгоритмов управления для автоматической генерации оптимальных сценариев реагирования.

Литература

1. Орешников В. В., Атаева А. Г. Территориальная трансформация или межмуниципальное сотрудничество: сравнительная оценка последствий на основе экономико-математического моделирования // Вестник Тюменского государственного университета. Социально-экономические и правовые исследования. – 2018. – Том 4. – № 4. – С. 271-296. – DOI: 10.21684/2411-7897-2018-4-4-271-296
2. Xu, R., Yu, X., Zhao, X.. Regional Economic Development Trend Prediction Method Based on Digital Twins and Time Series Network. Computers, Materials & Continua. – 2023. – 76(2). – P. 1781–1796. – URL: <https://doi.org/10.32604/cmc.2023.037293>
3. Kontokosta, C. E., Boyeong Hong, Nicholas E. Johnson, Daniel Starobin,. Using machine learning and small area estimation to predict building-level municipal solid waste generation in cities. Computers, Environment and Urban Systems – 2018. – vol. 70 – P. 151-162. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2018.03.004>
4. Демидова Е.А. Трансформация модели принятия экономических решений // Международный научно-исследовательский журнал. – 2021. – (10-2 (112)), С. 140-142. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/transformatsiya-modeli-prinyatiya-ekonomicheskikh-resheniy>
5. Медведев А. В. Цифровые двойники территорий для поддержки принятия решений в сфере регионального социально-экономического развития // Современные наукоемкие технологии. – 2020. – № 6-1. – С. 61-66. URL: <https://doi.org/10.17513/snt.38072>
6. Deren, L., Wenbo, Y. & Zhenfeng, S. Smart city based on digital twins // Comput.Urban Sci. – 2021. – URL: <https://doi.org/10.1007/s43762-021-00005-y>

7. Kumar R., Agrawal N. Shaping the future of industry: Understanding the dynamics of industrial digital twins// Computers & Industrial Engineering. – 2024. – vol. 191. – URL:<https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110172>
8. Hemdan, E.ED., El-Shafai, W. & Sayed, A. Integrating Digital Twins with IoT-Based Blockchain: Concept, Architecture, Challenges, and Future Scope. Wireless Pers Commun/ – 2023. – 131, 2193–2216 – URL: <https://doi.org/10.1007/s11277-023-10538-6>
9. Тимохин В. Н., Коломыцева А. О. Имитационное моделирование как основа для проектирования архитектуры цифровых двойников компаний // XVII международная конференция "Российские регионы в фокусе перемен": сборник докладов (Екатеринбург, 17–19 ноября 2022 г.). – Екатеринбург: ООО Издательский Дом «Ажур», 2023. – С. 652-656.
10. Рассказова В.А., Беренов Д.А. Модель объектных отношений для интеллектуального управления на основе производственных данных // Моделирование и анализ данных. – 2023. –Том 13. № 1. – С. 5–18. – DOI: <https://doi.org/10.17759/mda.2023130101>
11. Попков, В. В., Берг Д. Б., Ульянова Е. А., Селезнева Н. А., Попков В. В. Моделирование как инструмент формирования товарной и финансовой сети в региональной экономике // Экономика регионов. – 2015. – № 2. – С. 19. – DOI: 10.17059/2015-2-19. <https://doi.org/10.17059/2015-2-19>