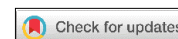


ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ INTELLIGENT SYSTEMS



УДК 338.49, 338.24
DOI: 10.37661/1816-0301-2025-22-2-7-32

Оригинальная статья
Original Article

Моделирование рисков развития «умного города» как сложной социотехнической системы

С. В. Кругликов¹, А. Г. Давыдовский^{2✉}

¹Объединенный институт проблем информатики
Национальной академии наук Беларуси,
ул. Сурганова, 6, Минск, 220012, Беларусь

²Институт информационных технологий Белорусского
государственного университета информатики и радиоэлектроники,
ул. Козлова, 28, Минск, 220037, Беларусь

✉E-mail: agd2011@list.ru

Аннотация

Цели. Экспоненциальный рост урбанизированных территорий и численности городского населения потребовал разработки новых моделей и методов описания, оптимального управления рисками современных городов как больших и сложных социальных, технологических и логистических систем. Работа посвящена проблеме анализа рисков развития «умного города» как сложной социотехнической системы с позиций гипотезы семи поколений «умных городов» с использованием элементов математического моделирования.

Методы. Использованы анализ литературных источников, моделирование семи поколений «умного города» как сложной социотехнической системы на основе линейных дифференциальных уравнений, сценарный анализ развития концепции «умного города».

Результаты. Представлена общая характеристика концепции «умного города» и рассмотрены риски дезорганизации сервисов и процессов жизнедеятельности «умного города». Обоснована гипотеза семи поколений «умного города». Разработаны системы линейных дифференциальных уравнений, характеризующие каждое из поколений «умного города». Предложен подход к моделированию и оценке интегрального риска «умного города».

Заключение. Разработаны системы линейных дифференциальных уравнений, характеризующие каждое из семи поколений «умного города», а также соответствующие им риски. Предложена обобщенная модель интегральной оценки рисков «умного города» как сложной социотехнической системы на основе нелинейного дифференциального уравнения. Сформулированы основы методологии управления рисками дезорганизации сервисов и процессов жизнедеятельности для различных поколений «умного города» как эволюционирующей социотехнической системы.

Ключевые слова: математическое моделирование, оценка рисков, социотехническая система, сценарный подход, «умный город»

Для цитирования. Кругликов, С. В. Моделирование рисков развития «умного города» как сложной социотехнической системы / С. В. Кругликов, А. Г. Давыдовский // Информатика. – 2025. – Т. 22, № 2. – С. 7–32. – DOI: 10.37661/1816-0301-2025-22-2-7-32.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию | Received 08.05.2025
Подписана в печать | Accepted 05.06.2025
Опубликована | Published 30.06.2025

Modelling the risks of "smart city" development as a complex sociotechnical system

Sergey V. Kruglikov¹, Anatoly G. Davydovskii²✉

¹*The United Institute of Informatics Problems
of the National Academy of Sciences of Belarus,
st. Surganova, 6, Minsk, 220012, Belarus*

²*Institute of Information Technologies of the Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics,
st. Kozlova, 28, Minsk, 220037, Belarus
✉E-mail: agd2011@list.ru*

Abstract

Objectives. The exponential growth of urbanized territories and urban populations required the development of new models and methods for describing and optimally managing the risks of modern cities as large and complex social, technological, and logistical systems. The paper is devoted to the problem of analyzing the risks of the development of a "smart city" as a complex sociotechnical system from the standpoint of the hypothesis of seven generations of "smart cities" using elements of mathematical modeling.

Methods. The analysis of literary sources, modeling the seven generations of the "smart city" as a complex sociotechnical system based on linear differential equations and a numerical analysis of the development of the "smart city" concept are used.

Results. The general characteristics of the "smart city" concept are presented and the risks of disruption of services and processes of the "smart city" are considered. The hypothesis of seven generations of the "smart city" is substantiated. Systems of linear differential equations have been developed that characterize each of the generations of the "smart city". An approach to modeling and assessing the integrated risk of a "smart city" is proposed.

Conclusion. Systems of linear differential equations have been developed that characterize each of the seven generations of the "smart city", as well as the risks associated with them. A generalized model of integrated risk assessment of a "smart city" as a complex sociotechnical system based on a nonlinear differential equation is proposed. The fundamentals of the methodology for managing the risks of disorganization of services and life processes for different generations of the "smart city" as an evolving sociotechnical system are formulated.

Keywords: mathematical modeling, risk assessment, sociotechnical system, scenario approach, "smart city"

For citation. Kruglikov S. V., Davydovskii A. G. *Modelling the risks of "smart city" development as a complex sociotechnical system*. Informatika [Informatics], 2025, vol. 22, no. 2, pp. 7–32 (In Russ.). DOI: 10.37661/1816-0301-2025-22-2-7-32.

Conflict of interest. The authors declare of no conflict of interest.

Введение. В первой четверти XXI в. городское население мира составило более 55 %. Особенно активно его численность возрастала в последние 70 лет. Если в 1950 г. в городах проживало около 751 млн человек, то в 2018 г. в мире насчитывалось уже 4,2 млрд горожан. По данным ООН, к 2050 г. доля жителей городов возрастет до 68 %. Наиболее урбанизированными регионами мира являются Северная Америка (82 % городского населения), Латинская Америка и страны Карибского бассейна (81 % городского населения), Европа (74 % городского населения) и Океания (68 % городского населения). В Российской Федерации 74,4 % граждан проживают в городах. При этом именно в городах производится порядка 87 % мирового внутреннего валового продукта [1]. В Республике Беларусь доля городского населения составляет 78,85 % [2]. Бурный рост городов и городского населения является не только результатом повышения эффективности мировой экономики, но и причиной возникновения множества проблем, обусловленных интенсивным развитием урбанизированной среды [3, 4]:

- низкого уровня управления и слабых институтов;
- неполноценной инфраструктуры;

- роста неравенства (1 млрд горожан в мире живут за чертой бедности, в 75 % городов мира ситуация с бедностью ухудшилась);
- дефицита жилья (в городах требуется более 1 млрд новых домов и квартир, свыше 880 млн человек живут в трущобах и за чертой бедности);
- высокого уровня высокотехнологической преступности;
- загрязнения окружающей среды (города, занимая до 3 % общей поверхности суши, потребляют 75 % природных ископаемых и обеспечивают 75 % токсичных выбросов в окружающую среду). Существенными экологическими рисками «умного города» могут быть широкое использование новых синтетических и композиционных материалов, прогрессивно возрастающее электромагнитное загрязнение окружающей среды (электромагнитный смог) вследствие распространения интернета вещей (Internet of Things, IoT), мобильных источников доступа в интернет, персонального и общественного электротранспорта, а также необходимость утилизации и (или) регенерации использованных электрических аккумуляторных элементов;
- новых рисков, включая высокотехнологический терроризм, быстрое распространение угроз кибербезопасности, возникновение и распространение новых штаммов возбудителей инфекционных заболеваний;
- распространения медиавирусов и инфодемий;
- избыточной секьюритизации информационных, технологических и экономических активов;
- рисков для здоровья населения «умного города», обусловленных электромагнитным загрязнением окружающей среды, снижением физической активности, нарушением естественных биологических ритмов жителей «умного города», информационным стрессом, токсическими нагрузками.

Экспоненциальный рост урбанизированных территорий и численности городского населения потребовал разработки новых моделей и методов описания, оптимального управления устойчивостью современных городов как больших и сложных социальных, технологических и логистических систем [2, 3]. В условиях четвертой технологической революции происходит сближение концепции виртуального города, которая позволяет реализовывать городские функции в киберпространстве, обеспечивая доступность городских инфраструктур, и предоставляет широкие каршеринговые услуги [4]. Подобный синтез технологий в условиях «умного города» неизбежно будет сопровождаться формированием новых рисков по мере развития технологий «умного города», иерархической сложности организации и эволюции его форм на основе социотехнического подхода. Вне последнего невозможно проектирование больших саморазвивающихся систем, к которым относятся и «умные города» [5, 6].

В этой связи целью работы является обоснование гипотезы семи поколений «умного города», а также моделирование рисков развития каждого из семи поколений и интегрального риска «умного города» как сложной социотехнической системы (СТС).

Риски «умного города» и их источники. Для постнеклассического типа проектирования и исследования больших и сложных систем с субъект-полисубъектной или метасубъектной парадигмой управления характерны широкое использование компьютерных технологий, эволюционизм и социотехнический подход [6].

Средовая парадигма саморазвивающихся больших и сложных систем является ведущей в постнеклассической науке. Все современные определения «умного города» предполагают интеграцию информационных и коммуникационных технологий, интернета вещей для управления городским имуществом, включая местные информационные системы, больницы, школы, библиотеки, транспорт, электростанции, системы водоснабжения и управления отходами, правоохранительные органы и другие общественные службы. Несмотря на наличие большого количества определений «умного города» (так, только в докладе Международного союза электросвязи (Женева, 2016) приведено 116 определений), «концептуальная неопределенность умных городов не тормозит их развития»¹ [7]. «Умный город» может быть охарактеризован как инфраструктура интегрированных сетей и технологий, обеспечивающая [8, 9]:

¹Trends in Smart City Development // National League of Cities. – URL: <http://www.nlc.org/sites/default/TrendsinSmartCity.pdf> (date of access: 31.07.2024).

«умную среду» – продвижение технологий устойчивого развития, использование возобновляемых источников энергии;

«умную администрацию» – новые модели прогнозирования развития, принятия решений в режиме реального времени, более качественного, быстрого и прозрачного оказания высокотехнологических услуг сервисов «умного города»;

«умную экономику» – поддержку предпринимательства и конкурентной среды, выработку новых форм экономического развития, например в виде экономики мобильных приложений, «шеринговой» экономики и т. п.;

«умное население» – эффективное информирование, поддержку социальных инициатив, инклюзивность и расширение возможности активного участия граждан с особенностями психофизического развития в управлении городом;

«умный образ жизни» – улучшение качества жизни, повышение безопасности и снижение рисков;

«умную мобильность» – саморегулируемые транспортные системы, беспилотные транспортные системы.

Вместе с тем недостаточно разработаны модели структурно-функциональной организации и управления «умным городом».

Анализ рисков «умного города» как СТС позволяет выделить социальные [10], технологические, технические, киберфизические, экономические, управленческие, институциональные риски [11], а также риски, связанные с деградацией человеческого капитала, и экологические риски.

Социальные риски обусловлены угрозами распространения вирусных, бактериальных и паразитарных инфекций, дезорганизацией здравоохранения, образования, безопасности, туризма, культуры [12]. Сюда можно отнести условия дезорганизации взаимодействия между гражданами, бизнесом и администрацией, а также распространение деструктивных субкультур. Важный вклад в социальные риски «умного города» вносит мотивация отдельных субъектов и групп населения к девиантному и делинквентному поведению, недостаточная готовность жителей к использованию современных и перспективных технологий. Очевидно, другой крайностью может быть преобладание идей технократического, транс- и постгуманистического сознания среди населения «умного города».

Технологические риски вызваны взаимодействием сервисов «умного города», использующих большие данные и интернет вещей, однако кибератака может исказить или уничтожить данные, что приведет к сбоям в системах управления и поддержки принятия решений, техногенным авариям. Далеко не всегда сбор и обработка всех доступных данных с датчиков является оптимальной стратегией. При этом большую угрозу кибербезопасности представляет утечка данных из информационной инфраструктуры «умного города» [12].

Технические риски – утечка данных, уязвимость для киберпреступников, зависимость жесткой инфраструктуры от информационной инфраструктуры. Такие риски могут существенно уменьшить эффективность участия граждан в управлении «умным городом», что снижает качество деятельности «умной администрации/правительства». Наиболее частой проблемой, возникающей в «умном городе», является обеспечение кибербезопасности и конфиденциальности данных, хотя круг проблем гораздо шире [13, 14].

Киберфизические риски обусловлены взаимосвязями и функционированием зданий, офисов, предприятий, транспортных магистралей, регионов в «умном городе». «Умный город» генерирует многочисленные потоки больших данных, но повсеместное внедрение цифровых технологий сопряжено с рисками утечек и потерь данных, включая персональные. При этом наиболее уязвимыми являются персональные мобильные смарт-устройства с интернетом вещей. Сетевые компьютерные эпидемии могут вызывать системные сбои в работе сервисов «умного города», вплоть до полной их дезорганизации и дезинтеграции. Учитывая информационно насыщенную коммуникационную среду «умного города», его население будет неизбежно подвергаться влиянию недостоверных медиаресурсов и медиавирусных сообщений, способных спровоцировать инфодемии [10, 15].

Экономические риски включают снижение эффективности внедряемых инноваций и усиление цифрового неравенства [16].

Управленческие риски включают техническую и психологическую неготовность властей, что связано с нежеланием администрации делегировать полномочия социальным сообществам «умного города», а также потерей городской аутентичности [17].

Институциональные риски включают отставание законодательства и правовой системы от технологий и сервисов, которые разрабатываются и инсталлируются в «умной» урбанизированной среде, а также наличие конфликта интересов между общественными и частными коммерческими кругами, между «умной администрацией» и «умным населением», отдельными потребителями и «умным бизнесом». Это требует контроля получения прибыли, в частности, от услуг шеринга.

Риски, связанные с деградацией человеческого капитала, включают неготовность населения к использованию технологий и негативным последствиям внедрения и освоения инноваций. При этом необходимо помнить об устойчивом, комфортном для жизни, экологичном, декарбонизированном развитии «умного города». Цифровизация и внедрение современных технологий не должны быть самоцелью. Здесь возникает риск «умного города» как технологической ловушки для его разработчиков, а затем и населения.

Экологические риски обусловлены высокими темпами распространения и наращивания мощностей информационных технологий и скорости процессов обработки данных. Цифровой сектор является потребителем значительных объемов электроэнергии. Так, в Дании центры обработки данных к 2030 г. будут потреблять более 15 % всей производимой электроэнергии, а сектор банковских услуг потребляет электроэнергии больше, чем сектор золотодобывающей промышленности. Развитие блокчейн-технологий вначале привело к росту потребления электроэнергии для проведения расчетов, а затем к излишку видеокарт, который обострил проблему электронных отходов. В 2021 г. мировой объем электронных отходов (e-waste) составил около 57 млн метрических тонн, из них только 2 % потоков твердых отходов, представляли собой около 70 % опасных отходов, попадающих в окружающую среду [14].

Биотоксикологические риски обусловлены биодеструкцией синтетических и композиционных материалов, используемых в бытовых, производственных и транспортных конструкциях и устройствах, а также в имплантируемых приборах и изделиях биомедицинского назначения.

Биосоциальные риски связаны с вероятностью возникновения и распространения инфекций, вызванных вирусными, бактериальными, грибковыми и паразитарными возбудителями, которые могут легко распространяться по канализационным и вентиляционным системам «умного города» в отсутствие фильтрационных и дезинфицирующих средств и устройств.

Информационно-психологические риски возникают при вирусном медиаконтенте, быстро распространяющимся по медиаканалам «умного города». В «умном городе» в условиях равномерного и практически мгновенного распространения информационных потоков чрезвычайно высок риск инфодемий. Кроме того, угрозы дезинтеграции подсистем «умного города» могут быть обусловлены как целенаправленными хакерскими и социоинженерными атаками, интенсивной продукцией потоков слабоструктурированных больших данных, превышающей возможности их обработки, так и случайными отказами оборудования или сбоями программного обеспечения, а также человеческим фактором [18].

Психофизиологические риски обусловлены нарушениями здоровья, вызванными гиподинамией; информационным стрессом, вызванным интенсивным воздействием медиаисточников, и дезорганизацией биологических ритмов вследствие возможности круглосуточной активности.

К *инклюзивным рискам* относятся события, связанные с осложнениями участия жителей из числа лиц с особенностями психофизического развития в социально-экономической, культурной, медийно-сетевой и социально-политической жизни сообщества «умного города».

Цифровые технологии обеспечивают организацию и поддержку взаимодействия в таких системах отношений, как администрация – администрации, администрация – гражданам, администрация – бизнесу, бизнес – гражданам, бизнес – бизнесу, бизнес – администрации, граждане – гражданам, граждане – бизнесу, граждане – администрации. Такие взаимоотношения являются источниками рисков «умного города» и служат основанием для разработки

перспективных классификаций (таксономий) рисков. В этой связи предложен перечень рисков «умного города», включающий:

- возникновение аварий беспилотного и шерингового транспорта;
- возникновение и распространение деструктивных цифровых субкультур, сетевых культов и сект;
- возникновение инфодемий;
- возникновение технологических инцидентов;
- высокую вероятность повторной идентификации предположительно анонимизированных или псевдоанонимизированных данных, повторного использования персональных данных и больших данных;
- деградацию культурных, политических и социальных особенностей «умного города»;
- комплексные ментально-психологические атаки на население «умного города» с последующим развитием инфодемий и массовых панических атак;
- массовое распространение недостоверной информации (фейков) и панических состояний;
- непрозрачное использование персональных данных и больших данных о функционировании сервисов «умного города» как большой и сложной СТС;
- несанкционированное использование технологий блокчейна [19], дополненной и виртуальной реальности, искусственного интеллекта, беспилотных транспортных систем;
- несанкционированное использование персональных данных жителей «умного города»;
- ошибочность выводов, основанных на случайных корреляциях между вариационными рядами больших данных, которые характеризуют деятельность сервисов «умного города»;
- повторное использование больших данных, генерируемых сервисами «умного города» (угрозу «двойной бухгалтерии» больших данных);
- подверженность психологическим манипуляциям по медийным каналам;
- подмену социальных, экономических и социально-политических аспектов реализации проекта «умного города» исключительно техническими вопросами;
- полную зависимость от технологий, порождающую криминальные риски;
- развитие «цифрового слабоумия»;
- распространение бактериальных и вирусных эпидемий;
- распространение эпидемии компьютерных и сетевых вирусов;
- реализацию проекта «умного города» в интересах отдельных элитарных групп населения;
- сбои функционирования логистических инфраструктур;
- сетевые кибератаки;
- снижение уровня коммуникативной культуры населения;
- снижение уровня образованности населения;
- социоинженерные атаки на граждан, учреждения, предприятия и информационные активы «умного города»;
- тотальный контроль над жителями и отдельными социальными группами населения «умного города»;
- феномены цифрового неравенства и цифрового разрыва между различными социальными группами граждан.

Гипотеза семи поколений «умных городов». Концепция «умного города» была разработана в рамках постнеклассической науки и на основе метасубъектной парадигмы управления. В процессе реализации она стала одним из маркеров перехода к постнеклассическому этапу проектирования и исследования больших и сложных СТС [4]. Их основу составляет интересубъектная парадигма управления – «умный город» как большая и сложная информационная СТС формируется уже не вокруг субъектов, а вокруг множества объектов, связанных между собой по радиоканалам в рамках интернета вещей, интернета людей и интернета ботов. Это свидетельствует о переходе от парадигмы «умный город для людей» и «умный город для ботов» с преобладанием интернета людей, интернета вещей, интернета процессов и «слабого» искусственного интеллекта в виде голосовых помощников и консультантов наподобие chatGPT к парадигме «умный город для не людей» с господством интернета вещей, интернета процессов и интернета

ботов. Таким образом, происходит трансформация «умного города» из социально-ориентированной в социально-деструктивную большую систему. В большой и сложной СТС «умного города» активно используются непрерывно достраиваемые информационно-технологические платформы, обеспечивающие реализацию всех сервисов, направленных на повышение эффективности управления ресурсами, улучшение качества жизни граждан и решение задач устойчивого социально-экономического и эколого-социотехнического развития. При этом основными условиями реализации «умного города» как развивающейся СТС выступают наличие развитой инфраструктуры (умных сетей, транспорта, энергоснабжения), управления большими данными (IoT-устройствами, комплексами сенсоров и аналитики), различных цифровых платформ, обеспечивающих участие и связь граждан с бизнесом, городской администрацией, транспортом, энергетикой, здравоохранением, образованием, а также обеспечение экологической безопасности и устойчивости «умного города» через интегрированные и централизованные платформы.

Авторами предложены основы гипотезы семи поколений «умного города», рассматривающей эволюцию «умного города» как последовательную смену технологических поколений «умного города» от 1.0 до 7.0, причем последнее поколение 7.0 будет финальным, после чего сама концепция «умных городов» утратит свою актуальность. При этом «умный город» поколения 1.0 – технологический (technology-driven) комплекс, который сфокусирован на внедрении отдельных технологий для решения конкретных проблем (умного освещения, видеонаблюдения). «Умный город» поколения 2.0 ориентирован на агентства (agency-driven) и осуществляет координацию между отдельными агентствами и ведомствами для улучшения городских сервисов. «Умный город» поколения 3.0 ориентирован на граждан (citizen-driven) и их активное вовлечение в процессы принятия решений и использование данных для улучшения городской жизни. «Умный город» поколения 4.0 ориентирован на бизнес (business-driven) и развитие инноваций за счет использования городских данных и технологий. «Умный город» поколения 5.0 является устойчивым (sustainable) комплексом, направленным на обеспечение устойчивого сбалансированного развития экологических, социальных и экономических процессов для создания комфортной среды для жизни. «Умный город» поколения 6.0 является инклюзивным (inclusive) и обеспечивает равный доступ к городским сервисам и возможностям для всех жителей независимо от их возраста, пола, социального статуса и физических особенностей. «Умный город» поколения 7.0 – сложный саморазвивающийся и самообучающийся (self-learning) урбоэко-социотехнический комплекс, который постоянно адаптируется и улучшается на основе данных и обратной связи от жителей и включенных систем.

Математические модели «умного города» поколений 1.0 – 7.0. Актуальной проблемой является математическое моделирование рисков развития различных поколений «умного города», для которого необходимо построение математических моделей, характеризующих каждое поколение «умного города» в отдельности.

Модель «умного города» поколения 1.0 включает следующие параметры:

уровень развития «умного города» ($U(t)$) – безразмерная величина, или процент (0–100 %), или балл. Отражает степень интеграции технологий и решений «умного города» в различные сферы, транспорт, энергетику, управление отходами (размерность – баллы, %);

уровень экономического роста ($G(t)$) – валовый городской продукт или его производная (размерность – денежные единицы/год, например, долл. США/год);

уровень инноваций ($I(t)$) – количество патентов, инвестиции в исследования и разработки, доля инновационных компаний (размерность – патенты/год, денежные единицы/год, %);

уровень социальной напряженности ($S(t)$) – количество протестов, уровень преступности, индекс социального неравенства, например коэффициент Джини (размерность – количество/год, %);

уровень устойчивости ($E(t)$) – уровень выбросов CO_2 , потребление ресурсов, индекс экологической устойчивости (размерность – тонны CO_2 /год, объем ресурсов/год, балл);

уровень цифровизации ($D(t)$) – проникновение интернета, использование мобильных устройств, объем данных, генерируемых в городе. Размерность – %, количество устройств/человек, объем данных (Тбайт);

уровень вовлеченности граждан ($C(t)$) – участие в принятии решений, активность в социальных сетях, использование городских сервисов (размерность – количество пользователей, %);

фактор турбулентности ($Turb(t)$) – суммарное влияние социально-экономических и социокультурных потрясений (например, пандемий, экономических кризисов, военных конфликтов). Представляет собой внешнее воздействие, изменяющее параметры системы (размерность – баллы и условные единицы, так как турбулентность обуславливает влияние на коэффициенты уравнений).

Закономерен вопрос о размерности итоговой модели, рассматривающей все переменные. Минимальная размерность модели (Dimension of the Model, DM_{min}) определяется количеством переменных, которые используются для описания состояния системы «умного города». Чем больше переменных, тем выше размерность модели и тем детальнее она описывает систему, но при этом возрастает сложность анализа и интерпретации результатов. В случае модели «умного города» поколения 1.0 (G1.0) ее минимальная размерность 1.0 $DM_{min} = 8$.

Каждая из ключевых переменных может быть описана линейным дифференциальным уравнением:

а) уровень развития «умного города» ($U(t)$):

$$\frac{dU(t)}{dt} = \alpha I(t) + \beta D(t) - \gamma S(t)T(t) - \delta E(t)Turb(t) + \varepsilon C(t), \quad (1)$$

где α – коэффициент, отражающий влияние инноваций на развитие «умного города»;

β – коэффициент, отражающий влияние цифровизации на развитие «умного города»;

γ – коэффициент, отражающий негативное влияние социальной напряженности на развитие «умного города», усиленное турбулентностью;

δ – коэффициент, отражающий негативное влияние экологических проблем на развитие «умного города», усиленное турбулентностью;

ε – коэффициент, отражающий влияние вовлеченности граждан;

б) уровень экономического роста ($G(t)$):

$$\frac{dG(t)}{dt} = \varphi U(t) + \psi I(t) - \omega S(t) - \zeta E(t), \quad (2)$$

где φ – коэффициент, отражающий влияние развития «умного города» на экономический рост;

ψ – коэффициент, отражающий влияние инноваций на экономический рост;

ω – коэффициент, отражающий влияние социальной напряженности на экономический рост;

ζ – коэффициент, отражающий влияние экологических проблем;

в) уровень инноваций ($I(t)$):

$$\frac{dI(t)}{dt} = \eta G(t) + \theta D(t) - \kappa S(t)Turb(t), \quad (3)$$

где η – коэффициент, отражающий влияние экономического роста на уровень инноваций;

θ – коэффициент, отражающий влияние цифровизации на уровень инноваций;

κ – коэффициент, отражающий негативное влияние социальной напряженности и турбулентности на уровень инноваций;

г) уровень социальной напряженности ($S(t)$):

$$\frac{dS(t)}{dt} = \lambda(1 - D(t))Turb(t) - \mu C(t) + \nu E(t)Turb(t), \quad (4)$$

где λ – коэффициент, отражающий влияние турбулентности и низкой цифровизации на социальную напряженность;

μ – коэффициент, отражающий влияние вовлеченности граждан на социальную напряженность;

v – коэффициент, отражающий влияние ухудшения экологической обстановки на социальную напряженность;

д) уровень устойчивости ($E(t)$):

$$\frac{dE(t)}{dt} = \xi G(t) - oU(t)Turb(t) - \pi Pol(t) + \sigma D(t), \quad (5)$$

где ξ – коэффициент, отражающий влияние экономического роста на устойчивость (учитывая, что экономический рост может вести к увеличению загрязнения);

o – коэффициент, отражающий негативное влияние развития «умного города» в условиях турбулентности (например, из-за неэффективного использования ресурсов);

π – коэффициент, отражающий влияние на уровень загрязнения в целом;

σ – коэффициент, отражающий влияние цифровизации на устойчивость (например, за счет повышения энергоэффективности);

е) уровень цифровизации ($D(t)$):

$$\frac{dD(t)}{dt} = \rho G(t) + \tau I(t) - vS(t)Turb(t), \quad (6)$$

где ρ – коэффициент, отражающий влияние экономического роста на цифровизацию;

τ – коэффициент, отражающий влияние инноваций на цифровизацию;

v – коэффициент, отражающий влияние социальной напряженности и турбулентности на цифровизацию;

ж) уровень вовлеченности граждан ($C(t)$):

$$\frac{dC(t)}{dt} = \chi D(t) + \psi_1 Pol(t) - \omega_1 S(t)Turb(t), \quad (7)$$

где χ – коэффициент, отражающий влияние цифровизации;

ψ_1 – коэффициент, отражающий влияние государственной политики;

ω_1 – коэффициент, отражающий влияние социальной напряженности и турбулентности;

$Pol(t)$ – комплексная характеристика внутренней социально-политической среды «умного города», которая может быть представлена как функция многих переменных;

з) фактор турбулентности $Turb(t)$:

$$\frac{dTurb(t)}{dt} = \alpha_1 S(t) - \beta_1 U(t) + \gamma_1 Pol(t), \quad (8)$$

где α_1 – коэффициент, отражающий влияние социальной напряженности на турбулентность;

β_1 – коэффициент, отражающий влияние уровня развития «умного города» на устойчивость к турбулентности;

γ_1 – коэффициент, отражающий влияние государственной политики.

При этом интегральный риск нарушений структурно-функциональной организации и процессов жизнедеятельности «умного города» поколения 1.0 можно охарактеризовать уравнением

$$Risk_{(1.0)} = C_{U(t)} \int U(t) dt + C_{G(t)} \int G(t) dt + C_{I(t)} \int I(t) dt + C_{S(t)} \int S(t) dt + C_{E(t)} \int E(t) dt + C_{D(t)} \int D(t) dt + C_{C(t)} \int C(t) dt + C_{Turb(t)} \int Turb(t) dt, \quad (9)$$

где $C_{U(t)}$, $C_{G(t)}$, $C_{I(t)}$, $C_{S(t)}$, $C_{E(t)}$, $C_{D(t)}$, $C_{C(t)}$, $C_{Turb(t)}$ – показатели потенциального ущерба соответственно от нарушения развития «умного города», стагнации экономического роста, дезорганизации инновационной деятельности и устойчивого развития, социальной напряженности, процессов цифровизации, недостаточной вовлеченности граждан, влияния фактора турбулентности.

Моделирование «умного города» поколения 2.0 рассматривает не только технологическую инфраструктуру, но и активное участие граждан в управлении городом, а также адаптацию к изменяющимся социально-экономическим и социокультурным условиям. Турбулентность связана с неопределенностью, кризисами, быстрыми изменениями в технологиях, социальных нормах и ценностях. Модель должна учитывать следующие ключевые аспекты «умного города» поколения 2.0:

- инфраструктуру – транспорт, энергетику, водоснабжение, связь;
- экономику – инновации, занятость, предпринимательство, туризм;
- социальную сферу – образование, здравоохранение, безопасность, культуру, социальную сплоченность;
- управление – участие граждан, открытые данные, электронное правительство, реагирование на кризисы;
- технологии – IoT, искусственный интеллект (artificial intelligence, AI), большие данные, облачные вычисления, блокчейн;
- окружающую среду – качество воздуха и воды, управление отходами, энергоэффективность, адаптацию к климатическим изменениям;
- человеческий капитал – уровень образования, компетенции, здоровье, креативность, социально-экономическую активность населения.

Минимальная размерность модели «умного города» поколения 2.0 $DM_{min} = 15$ ($8 + 7 = 15$).

Инфраструктуру «умного города» характеризуют следующие переменные:

$I_t(t)$ – индекс эффективности транспортной системы (среднее время в пути, загруженность дорог, доступность общественного транспорта);

$I_e(t)$ – индекс энергоэффективности (потребление энергии на душу населения, доля возобновляемых источников энергии);

$I_w(t)$ – индекс качества водоснабжения (доступность чистой воды, потери воды в сетях);

$I_c(t)$ – индекс развития телекоммуникационной инфраструктуры (покрытие интернетом, скорость передачи данных).

Экономику:

$E_i(t)$ – индекс инновационной активности (количество стартапов, патентов, инвестиции в исследования и разработки);

$E_e(t)$ – уровень занятости населения;

$E_t(t)$ – доходы от туризма.

Социальную сферу:

$S_e(t)$ – уровень образования населения;

$S_h(t)$ – индекс здоровья населения (средняя продолжительность жизни, уровень заболеваемости);

$S_s(t)$ – индекс безопасности (уровень преступности, количество дорожно-транспортных происшествий);

$S_c(t)$ – индекс социальной сплоченности (уровень доверия между людьми, участие в общественных мероприятиях).

Управление:

$G_p(t)$ – уровень участия граждан в управлении городом (использование онлайн-платформ для голосования, участие в общественных обсуждениях);

$G_o(t)$ – уровень открытости данных (доступность городских данных в открытом формате);

$G_e(t)$ – эффективность электронного правительства (удобство получения государственных услуг онлайн);

$G_r(t)$ – эффективность реагирования на кризисы (скорость и адекватность реагирования на стихийные бедствия, эпидемии).

Технологии:

$T_{IoT}(t)$ – уровень внедрения IoT-технологий (количество подключенных устройств, сбор данных);

$T_{AI}(t)$ – уровень использования AI в управлении городом (анализ данных, автоматизация процессов).

Окружающую среду:

$Env_{air}(t)$ – индекс качества воздуха;

$Env_{waste}(t)$ – эффективность системы управления отходами (доля переработанных отходов).

Человеческий капитал:

$HC_{skills}(t)$ – уровень развития навыков, необходимых для работы в условиях общества поколения 5.0 (например, цифровых навыков, критического мышления, креативности);

$HC_{adapt}(t)$ – способность населения адаптироваться к изменениям.

Ключевые переменные, в частности индекс эффективности транспортной системы, уровень образования населения, индекс инновационной активности, эффективность реагирования на кризисы, можно описать следующими линейными дифференциальными уравнениями:

индекс эффективности транспортной системы ($I_t(t)$):

$$\frac{dI_t(t)}{dt} = \alpha (T_{IoT}(t)G_p(t) - \beta(I_t(t) - I_t^*) + \gamma G_p(t)Turb(t), \quad (10)$$

где α – влияние IoT на участие граждан в транспортных коммуникациях;

β – тенденция к возвращению к некоторому равновесному состоянию (I_t^* – целевое значение);

γ – влияние эффективного реагирования на кризисы (например, пробки) и турбулентности ($Turb(t)$);

уровень образования населения ($S_e(t)$):

$$\frac{dS_e(t)}{dt} = \delta(G_p(t)T_{AI}(t)) - \lambda(S_e(t) - S_e^*) + \mu HC_{skills}(t), \quad (11)$$

где δ – положительное влияние участия граждан и AI на образование (например, онлайн-курсы, персонализированное обучение),

λ – тенденция к возвращению к равновесному состоянию (S_e^* – целевой уровень образования),

μ – влияние человеческого капитала;

индекс инновационной активности ($E_i(t)$):

$$\frac{dE_i(t)}{dt} = \nu(G_p(t)S_e(t)) + \xi T_{eAI}(t) - \pi Turb(t), \quad (12)$$

где ν – положительное влияние участия граждан и образования на инновации,

ξ – влияние AI,

π – негативное влияние социально-экономической и социокультурной турбулентности;

эффективность реагирования на кризисы ($G_r(t)$):

$$\frac{dG_r(t)}{dt} = \rho(T_{IoT}(t)T_{AI}(t)) - \sigma(G_r(t) - G_r^*), \quad (13)$$

где ρ – положительное влияние IoT и AI на реагирование на кризисы,

σ – тенденция к возвращению к равновесному состоянию (G_r^* – целевой уровень).

При этом интегральный риск нарушений структурно-функциональной организации и процессов жизнедеятельности «умного города» поколения 2.0 можно представить аддитивной моделью

$$Risk_{(2.0)} = Risk_{(1.0)} + C_{I(t)} \int dI_t(t) dt + C_{S(t)} \int dS_e(t) dt + C_{E(t)} \int dE_i(t) dt + C_{G_r(t)} \int dG_r(t) dt, \quad (14)$$

где $C_{I(t)}$, $C_{S(t)}$, $C_{E(t)}$, $C_{Gr(t)}$ – показатели потенциального ущерба от нарушений соответственно транспортной, образовательной, инновационной и антикризисной деятельности.

Для **моделирования эволюции «умного города» поколения 3.0** можно выделить следующие ключевые переменные:

экономику «умного города» ($Ec(t)$) – ВВП города, инвестиции в инновации, количество высокотехнологичных предприятий и т. д.;

социальную сферу ($Soc(t)$) – уровень образования, здравоохранения, социальной защиты, индекс счастья населения, уровень преступности и т. д.;

инфраструктуру ($Inf(t)$) – уровень развития транспортной сети, энергетической сети, сети связи, жилищного фонда, коммунального хозяйства и т. д.;

экологию ($Env(t)$) – уровень загрязнения воздуха, воды, уровень шумового загрязнения, объем отходов, площадь зеленых насаждений и т. д.;

технологии ($Tech(t)$) – уровень развития информационных технологий, искусственного интеллекта, интернета вещей, робототехники, блокчейна и т. д.;

управление ($Gov(t)$) – эффективность городского управления, уровень коррупции, участие граждан в управлении, прозрачность принятия решений и т. д.;

безопасность ($Sec(t)$) – уровень кибербезопасности, общественной безопасности, устойчивость к чрезвычайным ситуациям;

устойчивость ($Rec(t)$) – способность города адаптироваться к изменениям и восстанавливаться после шоков (экономических, социальных, экологических);

культуру и самобытность ($Cul(t)$) – поддержка местных традиций, развитие искусства, сохранение исторического наследия, создание новых культурных пространств.

Каждую из этих переменных можно детализировать, увеличив размерность модели. Минимальная размерность модели «умного города» поколения 3.0 $DM_{min} = 24$ ($15 + 9 = 24$).

Необходимо сформулировать систему дифференциальных уравнений, описывающих динамику изменения каждой переменной во времени. Эти уравнения должны отражать взаимосвязи между переменными и влияние внешних факторов, включая социально-экономическую и социокультурную турбулентность.

Упрощая и агрегируя многие процессы, предположим, что социально-экономическое хозяйство «умного города» можно представить четырехкомпонентной моделью, включающей инфраструктуры ($Inf(t)$), технологии ($Tech(t)$), городское управление ($Gov(t)$) и факторы социально-экономической, социотехнической и социокультурной турбулентности ($Turb(t)$), и описать линейными дифференциальными уравнениями.

В таком случае экономика «умного города» поколения 3.0 в общем виде может быть описана линейным дифференциальным уравнением:

$$\frac{dEc(t)}{dt} = \alpha Inf(t) + \beta Tech(t) + \gamma Gov(t) - \delta Turb(t), \quad (15)$$

где $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ – параметры, отражающие влияние инфраструктуры, технологий, управления и турбулентности на экономику города;

– социальный компонент $Soc(t)$:

$$\frac{d Soc(t)}{dt} = \varepsilon Ec(t) + \zeta Gov(t) + \eta Cul(t) - \theta Turb(t), \quad (16)$$

где $\varepsilon, \zeta, \eta, \theta$ – параметры, отражающие соответственно характер влияния экономики, управления, культуры, социально-экономической и социотехнической турбулентности на социальную сферу умного города;

– инфраструктурный компонент $Inf(t)$:

$$\frac{dInf(t)}{dt} = \lambda Ec(t) + \mu Gov(t) - \nu Env(t), \quad (17)$$

где λ, μ, ν – параметры, отражающие влияние экономики, управления и экологии на инфраструктуру;

– экологический компонент $Env(t)$:

$$\frac{dEnv(t)}{dt} = \rho Ec(t) + \sigma Tech(t) + \tau Man(t) Gov(t) - \varphi Turb(t), \quad (18)$$

где $\rho, \sigma, \tau, \varphi$ – параметры, отражающие влияние экономики, технологий, управления и турбулентности на окружающую среду (экологию) умного города,

$Man(t)$ – комплекс внешних информационных и иных манипулятивных влияний на управление «умным городом», который может быть представлена как функция многих переменных;

– технологический компонент $Tech(t)$:

$$\frac{dTech(t)}{dt} = \chi Ec(t) + \psi Gov(t) + \omega Soc(t) - \zeta Turb(t), \quad (19)$$

где $\chi, \psi, \omega, \zeta$ – параметры, отражающие влияние экономики, управления, социальной сферы и турбулентности на технологии;

– управленческий компонент $Gov(t)$:

$$\frac{dGov(t)}{dt} = ATech(t) + BSoc(t) - CTurb(t), \quad (20)$$

где A, B, C – параметры, отражающие влияние технологий, социальной сферы и турбулентности на управление;

– компонент безопасности $Scrt(t)$:

$$\frac{dScrt(t)}{dt} = DTech(t) + EGov(t) - FTurb(t), \quad (21)$$

где D, E, F – параметры, отражающие влияние технологий, управления и турбулентности на безопасность;

– компонент устойчивости ($Res(t)$):

$$\frac{dRes(t)}{dt} = GEc(t) + HSoc(t) + IEnv(t) + JSec(t) - KTurb(t), \quad (22)$$

где G, H, I, J, K – параметры, отражающие влияние экономики, социальной сферы, экологии, безопасности и турбулентности на устойчивость;

– культура и самобытность ($Cul(t)$):

$$\frac{dCul(t)}{dt} = LGov(t) + MSoc(t) - NTech(t) + OTurb(t), \quad (23)$$

где L, M, N, O – параметры, отражающие влияние управления, социальной сферы, технологий и турбулентности на культуру и социокультурную сферу.

При этом интегральный риск нарушений структурно-функциональной организации и процессов жизнедеятельности «умного города» поколения 3.0 можно охарактеризовать аддитивной моделью

$$\begin{aligned} Risk_{(3.0)} = & Risk_{(2.0)} + C_{Ec(t)} Ec(t) dt + C_{Soc(t)} \int Soc(t) dt + C_{Inf(t)} \int Inf(t) dt + \\ & + C_{Env(t)} \int Env(t) dt + C_{Tech(t)} \int Tech(t) dt + C_{Gov(t)} \int Gov(t) dt + \\ & + C_{Src(t)} \int Src(t) dt + C_{Res(t)} \int Res(t) dt + C_{Cul(t)} \int Cul(t) dt, \end{aligned} \quad (24)$$

где $C_{Ec}(t)$, $C_{Soc}(t)$, $C_{Inf}(t)$, $C_{Env}(t)$, $C_{Tech}(t)$, $C_{Gov}(t)$, $C_{Scrt}(t)$, $C_{Res}(t)$, $C_{Cul}(t)$ – показатели потенциального ущерба от нарушений соответственно развития «умного города», стагнации экономического роста, дезорганизации инновационной деятельности, устойчивого развития, процессов цифровизации, недостаточной вовлеченности граждан, влияния фактора турбулентности.

Моделирование эволюции «умного города» поколения 4.0 требует более комплексного подхода, чем в случае поколения 3.0. «Умный город» поколения 4.0 характеризуется как широким спектром применения цифровых технологий, так и глубокой интеграцией физического и киберпространства, ориентированностью на человека, устойчивостью развития социально-экономических процессов и высокой степенью адаптивности информационно-технологической платформы «умного города». Размерность модели «умного города» поколения 4.0 определяется количеством переменных, ключевыми среди которых являются (кроме описанных для модели «умного города» поколения 3.0 – экономика, социальная сфера, инфраструктура, экология, технологии, управление, безопасность, устойчивость, культура):

вовлеченность граждан ($Cit(t)$) – уровень участия граждан в принятии решений, использовании цифровых сервисов, предоставлении обратной связи;

персонализация сервисов ($Per(t)$) – степень адаптации городских сервисов к индивидуальным потребностям и предпочтениям граждан;

цифровая идентичность и доверие ($ID(t)$) – уровень безопасности и конфиденциальности цифровой информации граждан, уровень доверия к цифровым технологиям и городским властям;

устойчивость к киберугрозам ($Cyb(t)$) – защищенность городской инфраструктуры и сервисов от кибератак и сбоев;

инклюзивность и доступность ($Inc(t)$) – обеспечение равного доступа к городским ресурсам и сервисам для всех групп населения, включая людей с ограниченными возможностями, пожилых людей и представителей различных культур;

креативность и инновации ($Cre(t)$) – создание благоприятной среды для развития креативных индустрий, поддержки инновационных проектов и привлечения талантов;

энергетическая эффективность и декарбонизация ($En(t)$) – сокращение потребления энергии, использование возобновляемых источников энергии, снижение выбросов парниковых газов.

Минимальная размерность модели «умного города» поколения 4.0 $DM_{min} = 31$ ($24 + 7 = 31$).

Система дифференциальных уравнений для «умного города» поколения 4.0 будет более сложной, чем для «умного города» поколения 3.0, из-за большего количества переменных и более сложных взаимосвязей между ними, включая:

– вовлеченность граждан ($Cit(t)$):

$$\frac{dCit(t)}{dt} = aGov(t) + bTech(t) + cSoc(t) - dTurb(t), \quad (25)$$

где a, b, c, d – параметры, отражающие влияние управления, технологий, социальной сферы и турбулентности на вовлеченность граждан;

– персонализацию сервисов ($Per(t)$):

$$\frac{dPer(t)}{dt} = eTech(t) + fCit(t) - gID(t), \quad (26)$$

где e, f, g – параметры, отражающие влияние технологий, вовлеченности граждан и цифровой идентичности на персонализацию сервисов;

– цифровую идентичность и доверие ($ID(t)$):

$$\frac{dID(t)}{dt} = hGov(t) + iCyb(t) + jEth(t) - kTurb(t), \quad (27)$$

где h, i, j, k – параметры, отражающие влияние управления, кибербезопасности, этики и турбулентности на цифровую идентичность и доверие,

$Eth(t)$ – уровень этики использования технологий, который также может быть описан дифференциальным уравнением;

– устойчивость к киберугрозам ($Cyb(t)$):

$$\frac{dCyb(t)}{dt} = lTech(t) + m Gov(t) - nAtk(t), \quad (28)$$

где l, m, n – параметры, отражающие влияние технологий, управления и уровня киберугроз ($Atk(t)$);

– инклюзивность и доступность ($Inc(t)$):

$$\frac{dInc(t)}{dt} = oGov(t) + pSoc(t) + qTech(t) - rTurb(t), \quad (29)$$

где o, p, q, r – параметры, отражающие влияние управления, социальной сферы, технологий и турбулентности на инклюзивность и доступность;

– креативность и инновации ($Cre(t)$):

$$\frac{dCre(t)}{dt} = sTech(t) + tSoc(t) + uGov(t) - vTurb(t), \quad (30)$$

где s, t, u, v – параметры, отражающие влияние технологий, социальной сферы, управления и турбулентности на креативность и инновации;

– энергетическую эффективность и декарбонизацию ($En(t)$):

$$\frac{dEn(t)}{dt} = wTech(t) + xGov(t) - yEc(t), \quad (31)$$

где w, x, y – параметры, отражающие влияние технологий, управления и экономики на энергетическую эффективность и декарбонизацию.

При этом интегральный риск нарушений структурно-функциональной организации и процессов жизнедеятельности модели «умного города» поколения 4.0 можно описать аддитивной моделью

$$Risk_{(4.0)} = Risk_{(3.0)} + C_{Cit(t)} \int Cit(t) dt + C_{Per(t)} \int Per(t) dt + C_{Id(t)} \int Id(t) dt + C_{Cyb(t)} \int Cyb(t) dt + C_{Inc(t)} \int Inc(t) dt + C_{Cre(t)} \int Cre(t) dt + C_{En(t)} \int En(t) dt, \quad (32)$$

где $C_{Cit(t)}$, $C_{Per(t)}$, $C_{Id(t)}$, $C_{Cyb(t)}$, $C_{Inc(t)}$, $C_{Cre(t)}$, $C_{En(t)}$ – показатели потенциального ущерба от снижения соответственно вовлеченности граждан, персонализации сервисов, цифровой идентичности и доверия, устойчивости к киберугрозам, инклюзивности и доступности, креативности и инновационного потенциала, энергетической эффективности и декарбонизации.

Моделирование эволюции «умного города» поколения 5.0 представляет собой вершину в развитии концепции «умных городов», интегрируя в себе все лучшее от предыдущих поколений и фокусируясь на создании устойчивой, человеко-ориентированной и самоорганизующейся системы. Минимальный набор переменных, помимо тех, что были указаны для «умного города» поколения 4.0 (экономика, социальная сфера, инфраструктура, экология, технологии, управление, безопасность, устойчивость, культура и самобытность, вовлеченность граждан, персонализация сервисов, цифровая идентичность и доверие, устойчивость к киберугрозам, инклюзивность и доступность, креативность и инновации, энергетическая эффективность и декарбонизация), должен включать:

когнитивные способности системы ($Cog(t)$) – способность города к самообучению, анализу данных, прогнозированию, принятию решений в реальном времени;

самоорганизацию ($Org(t)$) – степень автономности различных городских подсистем и их способность к координации без централизованного управления;

адаптивность ($Adp(t)$) – способность города адаптироваться к изменяющимся условиям, новым технологиям и вызовам;

устойчивость к сложным системам ($Sys(t)$) – показатель, характеризующий способность города поддерживать стабильность и функциональность в условиях сложных взаимосвязанных систем;

этические рамки AI ($Eth(t)$) – четко определенные этические принципы и механизмы контроля за использованием искусственного интеллекта в городе;

биоцентричность ($Bio(t)$) – оценку соответствия городской среды потребностям биологических систем, включая человека, животных и растений;

циркулярную экономику ($Cir(t)$) – уровень внедрения принципов циркулярной экономики в различные сферы городской жизни.

Минимальная размерность модели «умного города» поколения 5.0 $DM_{min} = 38$ ($31 + 7 = 38$).

Система дифференциальных уравнений (33)–(39) будет еще более сложной и должна отражать взаимосвязи между новыми переменными и остальными показателями. При этом важно учитывать эффекты обратной связи и нелинейные зависимости.

В частности, когнитивные способности населения «умного города» поколения 5.0 как СТС ($Cog(t)$) могут быть описаны уравнением

$$\frac{dCog(t)}{dt} = aTech(t) + bOrg(t) + cEth(t) - dTurb(t), \quad (33)$$

где a, b, c, d – параметры, отражающие влияние технологий, самоорганизации, этических рамок и турбулентности на когнитивные способности системы;

– самоорганизация ($Org(t)$):

$$\frac{dOrg(t)}{dt} = eCog(t) + fInf(t) - gGov(t), \quad (34)$$

где e, f, g – параметры, отражающие влияние когнитивных способностей, инфраструктуры и управления на самоорганизацию;

– адаптивность ($Adp(t)$):

$$\frac{dAdp(t)}{dt} = kCog(t) + gSys(t) - pTurb(t), \quad (35)$$

где k, q, p – параметры, отражающие влияние когнитивных способностей, устойчивости к сложным системам и турбулентности на адаптивность;

– устойчивость к сложным системам ($Sys(t)$):

$$\frac{dSys(t)}{dt} = lAdp(t) + mTech(t) + nInc(t), \quad (36)$$

где l, m, n – параметры, отражающие влияние адаптивности, технологий и инклюзивности на устойчивость к сложным системам;

– этические рамки AI ($Eth(t)$):

$$\frac{dEth(t)}{dt} = lGov(t) + oSoc(t) + rCog(t) - sTurb(t), \quad (37)$$

где l, o, r, s – параметры, отражающие влияние управления, социальной сферы, когнитивных способностей и турбулентности на этические рамки AI;

– биоцентричность ($Bio(t)$):

$$\frac{dBio(t)}{dt} = tEnv(t) + uInf(t) + wCit(t) + zEth(t), \quad (38)$$

где t, u, w, z – параметры, отражающие влияние экологии, инфраструктуры, вовлеченности граждан и этических рамок AI на биоцентричность;

– циркулярная экономика ($Cir(t)$):

$$\frac{dCir(t)}{dt} = a_cEnv(t) + e_cTech(t) + i_cGov(t) + j_cTurb(t), \quad (39)$$

где a_c, e_c, i_c, j_c – параметры, отражающие влияние экологии, технологий, управления и турбулентности на циркулярную экономику.

Моделирование эволюции «умного города» поколения 5.0 в условиях социально-экономической и социокультурной турбулентности при переходе к обществу 5.0 представляет собой сложную, но необходимую задачу. Создание такой модели требует интеграции передовых знаний и технологий из различных областей науки и техники, а также широкого вовлечения заинтересованных сторон. Успешное моделирование позволит городским властям принимать более обоснованные решения, строить устойчивые и процветающие города будущего и создавать комфортную и безопасную среду для жизни граждан. При этом интегральный риск нарушений структурно-функциональной организации и процессов жизнедеятельности модели «умного города» поколения 5.0 можно охарактеризовать аддитивной моделью

$$Risk_{(5.0)} = Risk_{(4.0)} + C_{Cog(t)} \int Cog(t) dt + C_{Org(t)} \int Org(t) dt + C_{Adp(t)} \int Adp(t) dt + C_{Sys(t)} \int Sys(t) dt + C_{Eth_AI(t)} \int Eth_AI(t) dt + C_{Bio(t)} \int Bio(t) dt + C_{Cir(t)} \int Cir(t) dt, \quad (40)$$

где $C_{Cog(t)}, C_{Org(t)}, C_{Adp(t)}, C_{Sys(t)}, C_{Eth_AI(t)}, C_{Bio(t)}, C_{Cir(t)}$ – потенциальный ущерб соответственно от снижения когнитивного потенциала населения, самоорганизации и адаптивности, устойчивости к сложным системам, этических рамок использования технологий AI, биоцентричности и качественного состояния циркулярной экономики (экономики замкнутого цикла).

Моделирование эволюции «умного города» поколения 6.0 – это концептуально продвинутый этап, представляющий собой самовосстанавливающуюся, саморазвивающуюся и сознательную экосистему, ориентированную на максимальное благополучие каждого жителя. В условиях социально-экономической и социокультурной турбулентности при переходе к обществу 5.0 такая модель должна обладать не только адаптивностью, но и способностью к предвидению и активному формированию будущего.

Сложность модели «умного города» поколения 6.0 возрастает экспоненциально по сравнению с предыдущими поколениями. Это связано с необходимостью учета не только физических, цифровых и когнитивных аспектов, но и факторов, определяющих самосознание, этическую зрелость и способность к коллективному разуму.

К перечню переменных, определенных для «умного города» поколения 5.0, добавляются следующие:

коллективный разум (collective mind, $CM(t)$) – способность городской системы к коллективному решению проблем, объединению интеллекта и опыта жителей, организаций и AI для достижения общих целей;

самосознание ($Slf(t)$) – степень осознания городом своих сильных и слабых сторон, ресурсов, ограничений и целей. Включает в себя способность к самооценке и самокритике;

предвидение ($Pre(t)$) – способность системы к долгосрочному прогнозированию, выявлению будущих трендов и рисков, разработке адаптивных стратегий;

этическая зрелость ($Eth(t)$) – уровень развития этических норм и ценностей в системе управления городом и в сознании жителей. Включает принципы справедливости, равенства, устойчивости и ответственности;

креативное самовыражение ($Cre(t)$) – возможности для жителей реализовывать свой творческий потенциал, создавать новые продукты, сервисы и культурные ценности;

психическое здоровье ($Men(t)$) – уровень психического благополучия жителей города, снижение уровня стресса, тревожности и депрессии;

духовное развитие ($Spi(t)$) – поддержка религиозных, философских и духовных потребностей жителей, создание условий для личностного роста и самосовершенствования;

управление смыслами ($Mng(t)$) – способность городской системы создавать и поддерживать общие ценности, смыслы и цели, которые объединяют жителей и направляют развитие города;

устойчивость к экзистенциальным рискам ($Exi(t)$) – готовность города к противодействию глобальным угрозам, таким как изменение климата, пандемии, ядерная война и другие катастрофы.

Минимальная размерность модели «умного города» поколения 5.0 $DM_{min} = 47$ ($38 + 9 = 47$). Между тем реальная размерность может быть на порядок выше, если детализировать каждую из этих переменных.

Система дифференциальных уравнений для «умного города» поколения 6.0 становится чрезвычайно сложной и требует применения продвинутых методов моделирования, таких как мультиагентное моделирование, системная динамика с когнитивными агентами, нейросетевое моделирование и эволюционные алгоритмы.

Дифференциальные уравнения (41)–(48) модели «умного города» поколения 6.0 включают следующие компоненты:

- коллективный разум $CM(t)$:

$$\frac{dCM(t)}{dt} = \alpha Cog(t) + \beta Soc(t) + \gamma Cit(t) + \delta Eth_m(t) - \varepsilon Turb(t), \quad (41)$$

где $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon$ – параметры, отражающие влияние когнитивных способностей, социальной сферы, вовлеченности граждан, этической зрелости и турбулентности на коллективный разум;

- самосознание ($Slf(t)$):

$$\frac{dSlf(t)}{dt} = \zeta CM(t) + \eta Pre(t) + \theta Gov(t), \quad (42)$$

где ζ, η, θ – параметры, отражающие влияние коллективного разума, предвидения и управления на самосознание;

- этическую зрелость ($dEth_m(t)$):

$$\frac{dEth_m(t)}{dt} = mGov(t) + nSoc(t) + oCM(t) + pSpi(t) - qTurb(t), \quad (43)$$

где m, n, o, p, q – параметры, отражающие влияние управления, социальной сферы, коллективного разума, духовного развития и турбулентности на этическую зрелость;

- креативное самовыражение ($Cre(t)$):

$$\frac{dCre(t)}{dt} = rSoc(t) + sTech(t) + tCul(t) + uMen(t), \quad (44)$$

где r, s, t, u – параметры, отражающие влияние социальной сферы, технологий, культуры и психического здоровья на креативное самовыражение;

- психическое здоровье ($Men(t)$):

$$\frac{dMen(t)}{dt} = vSoc(t) + wCre(t) + xSpi(t) - yTurb(t), \quad (45)$$

где v, w, x, y – параметры, отражающие влияние социальной сферы, креативного самовыражения, духовного развития и турбулентности на психическое здоровье;

– духовное развитие ($Spi(t)$):

$$\frac{dSpi(t)}{dt} = zSoc(t) + aaEth_m(t) + bb Men(t), \quad (46)$$

где z, aa, bb – параметры, отражающие влияние социальной сферы, этической зрелости и психического здоровья на духовное развитие;

– управление смыслами ($Mng(t)$):

$$\frac{dMng(t)}{dt} = ccGov(t) + ddEth_m(t) + eeCM(t) + ffCre(t), \quad (47)$$

где cc, dd, ee, ff – параметры, отражающие влияние управления, этической зрелости, коллективного разума и креативного самовыражения на управление смыслами;

– устойчивость к рискам социально-экономической турбулентности ($Exit(t)$):

$$\frac{dExit(t)}{dt} = ggPre(t) + hhTech(t) + iiInf(t) + jjCM(t) - kk Turb(t), \quad (48)$$

где gg, hh, ii, jj, kk – параметры, отражающие влияние предвидения, технологий, инфраструктуры, коллективного разума и турбулентности на устойчивость к экзистенциальным рискам.

Моделирование эволюции «умного города» поколения 6.0 потребует значительных усилий со стороны мирового научного сообщества и тесного сотрудничества между учеными, инженерами, политиками и гражданами. «Умный город» поколения 6.0 должен стать не только эффективным и удобным местом для жизни, но и платформой для развития человеческого потенциала, создания новых знаний и решения глобальных проблем.

При этом интегральный риск нарушений структурно-функциональной организации и процессов жизнедеятельности «умного города» поколения 6.0 можно описать аддитивной моделью

$$\begin{aligned} Risk_{(6.0)} = Risk_{(5.0)} + C_{CM(t)} \int CM(t) dt + C_{Slf(t)} \int Slf(t) dt + C_{Eth(t)} \int Eth(t) dt + \\ + C_{Cre(t)} \int Cre(t) dt + C_{Men(t)} \int Men(t) dt + C_{Spi(t)} \int Spi(t) dt + \\ + C_{Mng(t)} \int Mng(t) dt + C_{Exit(t)} \int Exit(t) dt, \end{aligned} \quad (49)$$

где $C_{CM(t)}, C_{Slf(t)}, C_{Eth(t)}, C_{Cre(t)}, C_{Men(t)}, C_{Spi(t)}, C_{Mng(t)}, C_{Exit(t)}$ – показатели потенциального ущерба от нарушения соответственно функционирования коллективного разума «умного города», самосознания жителей, предвидения, этической зрелости, креативного самовыражения, психического здоровья, духовного развития, управления смыслами, устойчивости к рискам устойчивого существования «умного города» поколения 6.0 как СТС.

Моделирование эволюции «умного города» поколения 7.0 представляет собой теоретическую вершину, где город достигает симбиотических отношений с окружающей средой, его жителями и даже с другими городами, создавая глобальную сеть устойчивых и саморегулируемых систем. Размерность модели «умного города» поколения 7.0 является наиболее высокой из всех поколений, так как включает в себя все предыдущие факторы, а также новые измерения, связанные с межвидовым взаимодействием, глобальной связностью, технологиями будущего и метафизическими аспектами.

К переменным, определенным для «умного города» поколения 6.0, добавляются следующие: межвидовые взаимоотношения ($Int(t)$) – степень взаимодействия с другими живыми существами (животными, растениями, экосистемами), включая биоразнообразие и экологическое равновесие;

глобальная связность ($Gbl(t)$) – степень интеграции с глобальными сетями знаний, ресурсов, инноваций и управления;

синхронизация с циклами природы ($Nat(t)$) – соответствие ритмам природы (временам года, солнечной активности, биоритмам) и использование природных ресурсов максимально эффективно;

трансцендентность ($Tra(t)$) – способность города к изменению своих фундаментальных принципов и целей, включая выход за рамки привычных ограничений и создание новых способов существования;

квантовая коммуникация ($Qc(t)$) – возможность использования квантовых технологий для коммуникации, обработки данных и управления;

управление сознанием ($Con(t)$) – способность системы понимать и управлять сознанием людей (в этических рамках) для повышения благополучия и решения проблем;

экологическое сознание ($Eco(t)$) – уровень осознания жителями города своей роли в сохранении окружающей среды и бережного отношения к природным ресурсам;

управление временем ($Tim(t)$) – способность города оптимизировать использование времени, учитывая биоритмы, личные предпочтения и приоритеты;

космические связи ($Cos(t)$) – готовность и способность города к взаимодействию с внесезонными цивилизациями.

Минимальная размерность модели «умного города» поколения 5.0 $DM_{min} = 56$ ($47 + 9 = 56$).

Система дифференциальных уравнений (50)–(58) модели «умного города» поколения 7.0 включает следующие компоненты:

– межвидовые взаимоотношения ($Int(t)$):

$$\frac{dInt(t)}{dt} = aEnv(t) + bBio(t) + cEco(t) - dTurb(t), \quad (50)$$

где a, b, c, d – параметры, отражающие влияние экологии, биоцентричности, экологического сознания и турбулентности на межвидовые взаимоотношения;

– глобальную связность ($Gbl(t)$):

$$\frac{dGbl(t)}{dt} = eCol(t) + fTech(t) + gCos(t) - hTurb(t), \quad (51)$$

где e, f, g, h – параметры, отражающие влияние коллективного разума, технологий, космических связей и турбулентности на глобальную связность;

– синхронизацию с циклами природы ($Nat(t)$):

$$\frac{dNat(t)}{dt} = iEnv(t) + jTim(t) + kEco(t), \quad (52)$$

где i, j, k – параметры, отражающие влияние экологии, управления временем и экологического сознания на синхронизацию с циклами природы;

– трансцендентность ($Tra(t)$):

$$\frac{dTra(t)}{dt} = lSlf(t) + mCol(t) + nSpi(t), \quad (53)$$

где l, m, n – параметры, отражающие влияние самосознания, коллективного разума и духовного развития на трансцендентность;

– квантовую коммуникацию ($Oc(t)$):

$$\frac{dOc(t)}{dt} = oTech(t) + pGbl(t), \quad (54)$$

где o, p – параметры, отражающие влияние технологий и глобальной связности на квантовую коммуникацию;

- управление сознанием ($Con(t)$):

$$\frac{dCon(t)}{dt} = qMen(t) + rEth(t), \quad (55)$$

где q, r – параметры, отражающие влияние психического здоровья и этической зрелости на управление сознанием (в этических рамках);

- экологическое сознание ($Eco(t)$):

$$\frac{dEco(t)}{dt} = sEnv(t) + tSoc(t) + uInt(t), \quad (56)$$

где s, t, u – параметры, отражающие влияние экологии, социальной сферы и межвидовых взаимоотношений на экологическое сознание;

- управление временем ($Tim(t)$):

$$\frac{dTim(t)}{dt} = vCog(t) + wMng(t) + xPre(t), \quad (57)$$

где v, w, x – параметры, отражающие влияние когнитивных способностей, управления смыслами и предвидения на управление временем;

- космические связи ($Cos(t)$):

$$\frac{dCos(t)}{dt} = yGbl(t) + zTech(t), \quad (58)$$

где y, z – параметры, отражающие влияние глобальной связности и технологий связи с удаленными космическими объектами.

При этом интегральный риск нарушений структурно-функциональной организации и процессов жизнедеятельности «умного города» поколения 7.0 можно представить аддитивной моделью

$$\begin{aligned} Risk_{(7.0)} = Risk_{(6.0)} + C_{Int(t)} \int Int(t) dt + C_{Gbl(t)} \int Gbl(t) dt + C_{Nat(t)} \int Nat(t) dt + \\ + C_{Tra(t)} \int Tra(t) dt + C_{Jc(t)} \int Jc(t) dt + C_{Con(t)} \int Con(t) dt + C_{Eco(t)} \int Eco(t) dt + \\ + C_{Tim(t)} \int Tim(t) dt + C_{Cos(t)} \int Cos(t) dt, \end{aligned} \quad (59)$$

где $C_{Int(t)}, C_{Gbl(t)}, C_{Nat(t)}, C_{Tra(t)}, C_{Jc(t)}, C_{Con(t)}, C_{Eco(t)}, C_{Tim(t)}, C_{Cos(t)}$ – потенциальный ущерб от нарушений соответственно межвидовых взаимоотношений ($Int(t)$), глобальной связности ($Gbl(t)$), синхронизации с природными и биологическими циклами ($Nat(t)$), технологической трансцендентности ($Tra(t)$), квантовой коммуникации ($Jc(t)$), управления индивидуальным и коллективным сознанием граждан ($Con(t)$), экологическими системами ($Eco(t)$), управления временем ($Tim(t)$), управления космическими связями с «умными сообществами», находящимися на околоземных орбитах, за их пределами и на других небесных телах ($Tra(t)$).

Система дифференциальных уравнений для «умного города» поколения 7.0 будет невероятно сложной, требующей использования самых передовых методов математического моделирования, включая мультиагентное моделирование с квантовыми вычислениями и системную динамику с когнитивными агентами, наделенными самосознанием и способностью к трансцендентному мышлению на основе механизмов самообучения и саморазвития; нейросетевое моделирование, учитывающее сознательные процессы, эволюционные алгоритмы для поиска оптимальных решений в динамичных условиях, а также метафизическое моделирование (в рамках этических ограничений) – учет влияния духовных факторов и высших целей на развитие города.

Успешное создание такой модели может не только привести к созданию городов будущего, но и оказать влияние на развитие всего человечества и гармоничного сосуществования с окружающей средой и космосом.

При анализе моделей различных поколений «умного города» целесообразен сценарный подход. Для обсуждения могут быть предложены четыре потенциально возможных сценария:

- устойчивого роста, требующий высокие инвестиции в «зеленую экономику», ресурсосберегающие технологии, эффективную социальную политику, низкую интенсивность факторов социальной напряженности;
- цифровой трансформации, предполагающий быстрое развитие цифровых технологий, но, возможно, рост социального неравенства;
- кризиса, допускающий высокую вероятность турбулентности социально-экономических процессов и дезорганизации социотехнических систем с последующим замедлением экономического развития и ростом социальной напряженности;
- регресса, возможный при условии недостаточных инвестиций, неэффективной политики, быстрого роста социальной напряженности, снижения уровня развития человеческого потенциала населения.

Кроме того, предложены пять сценариев эволюционного развития «умного города» – ноосферный, сбалансированный, устойчивого развития, технократический и постгуманистический. Очевидно, что на практике реальный сценарий развития «умного города» будет включать признаки каждого из вышеперечисленных сценариев.

Моделирование интегрального риска «умного города». Важную роль в моделировании рисков развития «умного города» как СТС играют анализ и моделирование турбулентности социально-экономической среды ($Turb(t)$) «умного города». В целом турбулентность сложно формализовать, но можно ввести функцию $T(t)$, которая отражает уровень неопределенности и резких изменений. Это может быть случайный процесс (например, белый шум) или функция, зависящая от внешних факторов (например, экономических кризисов, социальных волнений, технологических прорывов). Турбулентность «умного города» как развивающейся СТС можно моделировать различными способами в зависимости от конкретных сценариев с помощью стохастической, периодической и импульсной моделей. Авторы предлагают комбинированную модель турбулентности социально-экономической среды «умного города»:

$$Turb(t) = \sum_{i=1}^n A_i \delta(t - t_i) + \sum_{i=1}^n A_i \sin(\omega_i t + \varphi_i) + \varepsilon(t), \quad (60)$$

где A_i – амплитуда импульса событий;

t_i – момент времени, когда происходит импульс событий;

$\delta(t)$ – дельта-функция Дирака;

$\omega_i(t)$ – частота колебаний i -й социально-экономической характеристики;

$\varphi_i(t)$ – фаза колебаний i -й социально-экономической характеристики;

$\varepsilon(t)$ – случайный шум.

Необходимо отметить, что каждое поколение «умного города» характеризуется собственными рисками, обусловленными как используемыми технологиями, уровнем развития и организации социально-экономических, технологических и социокультурных процессов, так и турбулентностью социально-экономической среды.

Здесь уместен как качественный, так и количественный анализ рисков «умного города». С качественной точки зрения эволюционное развитие концепции «умного города» как СТС неизбежно будет сталкиваться с вызовами и рисками киберугроз, связанных с уязвимостью информационно-технологических инфраструктур и платформ, технологической зависимостью, этическим дисбалансом и социальным расслоением.

С количественной точки зрения риски эволюционного развития «умного города» как СТС можно представить в виде модели семи поколений, которая предполагает, что в «умном городе», к какому бы поколению он ни относился, будут потенциально присутствовать риски всех остальных шести поколений. Хотя, безусловно, определяющими будут риски каждого положе-

ния «умного города» в отдельности ($Risk_{Gi}(t)$). Тогда обобщенную модель интегрального риска «умного города» как СТС, находящейся на уровне поколения G_i , можно представить нелинейным дифференциальным уравнением:

$$\frac{d Risk_{Gi}(t)}{dt} = K_i \left(Risk_{Gi}(t) + \sum_{j \in [1,7]} \omega_j \left(Risk_{Gj}(t) \right) + Turb_{Gi}(t) \right) Risk_{Gi}(t), \quad (61)$$

где $Risk_{Gi}(t)$ – риски «умного города» поколения G_i ;

$Risk_{Gj}(t)$ – риски «умного города» поколения G_j (причем $i \neq j$);

$Turb_{Gi}(t)$ – турбулентность социально-экономической среды «умного города» поколения G_i ;

K_i – постоянная, характеризующая прирост рисков в «умном городе» поколения G_i .

В общем виде интегральный риск «умного города» ($Risk_{SC}$) любого поколения обусловлен присутствием технологий и факторов риска, относящихся к его другим поколениям:

$$Risk_{SC} = \omega_1 Risk_{(1.0)} + \omega_2 Risk_{(2.0)} + \omega_3 Risk_{(3.0)} + \omega_4 Risk_{(4.0)} + \omega_5 Risk_{(5.0)} + \omega_6 Risk_{(6.0)} + \omega_7 Risk_{(7.0)}, \quad (62)$$

где ω_{1-7} – удельно-весовые коэффициенты рисков, присущих каждому поколению «умного города».

Численное моделирование рисков поколений «умного города» как СТС может быть осуществлено *in silico* в программной среде MATLAB, Simulink, а также с помощью языка высокого уровня Python с использованием библиотек SciPy, NumPy, PySD. Кроме того, моделирование причинно-следственных логических связей между факторами, событиями и процессами, приводящими к формированию рисков в СТС «умный город», может быть успешно осуществлено с помощью Vensim – специализированного программного обеспечения для моделирования системной динамики сложных СТС.

Заключение. Многомерная интеграция людей, производственных сообществ и технологий в рамках «умного города» как сложной СТС, которая формирует единую интеллектуальную, технологическую и социокультурную среду, будет неизбежно порождать принципиально новые социотехнические, технологические и биосоциальные риски. Такие риски, обусловленные внедрением конвергентных технологий в условиях четвертой промышленной революции, могут иметь многомерные и сложные биосоциальные и социогуманитарные последствия, анализ и оценка которых выходят за пределы настоящей работы и затрагивают проблемы глубокой трансформации человека в перспективных урбанизированных сообществах, таких как «умный город», с учетом смены его поколений.

Феномен «умного города» является продуктом определенной социально-экономической формации и результатом определенного достигнутого уровня технологических возможностей, социальных отношений и социокультурного развития. «Умный город» представляет собой большую и сложную социотехническую систему, включающую разнообразные технологические сервисы, интегрированные друг с другом и обслуживающие различные категории населения. В свою очередь, «умный город» становится инструментом технологических и социотехнических преобразования сформировавшей его социально-экономической формации.

Таким образом, «умный город» можно рассматривать как социотехническую технологию преобразования социально-экономической формации, реализовавшей его как проект на определенном уровне технологического, экономического и социального развития. При этом переход от одного поколения «умного города» к другому может оказывать эффект драйвера, преобразующего реальную социально-экономическую формацию. При этом важнейшее значение приобретает управление рисками «умного города».

На основе гипотезы семи поколений «умного города», рассматривающей эволюцию «умного города» как последовательную смену его технологических поколений от 1.0 до 7.0, предложены математические модели каждого из семи поколений на основе линейных дифференциаль-

ных уравнений. Представлены математические модели рисков нарушения структурно-функциональной организации и процессов жизнедеятельности «умного города» для поколений 1.0 – 7.0 (формулы (9), (14), (24), (32), (40), (49), (59)).

Вместе с тем предложенные модели рисков нарушения структурно-функциональной организации и процессов жизнедеятельности «умного города» в различных поколениях могут являться одной из основ для методологии эволюционного проектирования экосистем «умных сообществ и регионов» не только как киберфизических, но и как больших и сложных социотехнических систем, обладающих потенциалом драйверов развития человеческой цивилизации.

Вклад авторов. *А. Г. Давыдовский* предложил провести моделирование рисков развития «умного города» на основе сценарного подхода. *С. В. Кругликов* сформулировал цель и задачи исследования. Оба автора принимали участие в подготовке текста статьи, анализе и интерпретации результатов исследования.

Список использованных источников

1. Одинцов, А. В. Основные риски реализации концепции «умного города» / А. В. Одинцов // Социодинамика. – 2019. – № 10. – С. 1–8. – DOI: 10.25136/2409-7144.2019.10.30636.
2. Беларусь в цифрах. Статистический справочник 2025. – Минск : НСК РБ, 2025. – 62 с.
3. Костина, Е. А. Риски умного города / Е. А. Костина // Мир экономики и управления. – 2023. – Т. 23, № 2. – С. 108–125. – DOI: 10.25205/2542-0429-2023-23-2-108-125.
4. Шваб, К. Технологии четвертой промышленной революции / К. Шваб, Н. Дэвис ; пер. с англ. – М., 2018. – 317 с.
5. Умная инфраструктура, физические и информационные активы, Smart Cities, BIM, GIS и IoT / В. П. Куприяновский, В. В. Аленков, И. А. Соколов [и др.] // International Journal of Open Information Technologies. – 2017. – Vol. 5, № 10. – С. 55–86.
6. The theoretical foundations of sociotechnical systems change for sustainability: A systematic literature review / P. Savaget, M. Geissdoerfer, A. Kharrazi, S. Evans // Journal of Cleaner Production. – 2019. – Vol. 206. – P. 878–892. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.09.208.
7. Саак, А. Э. Модели информационно-технологической структуры умного города / А. Э. Саак, В. Н. Тюшняков, Е. В. Пахомов // Фундаментальные исследования. – 2017. – № 10-2. – С. 387–391.
8. Kitchin, R. Data-driven, networked urbanism / R. Kitchin // Steps. – 2017. – Vol. 3, no. 2. – P. 98–116.
9. Smart home energy management systems in internet of things networks for green cities demands and services / M. S. Aliero, K. N. Qureshi, M. F. Pasha, G. Jeon // Environmental Technology & Innovation. – 2021. – Vol. 22. – URL: <https://www.sci-hub.ru/10.1016/j.eti.2021.101443> (date of access: 17.06.2024).
10. Frank, E. Smart City = Smart Citizen = Smart Economy? An Economic Perspective of Smart Cities / E. Frank, G. Aznar Fernández-Montesinos // Social, Legal, and Ethical Implications of IoT, Cloud, and Edge Computing Technologies, IGI Global, Hershey / ed.: G. Cornetta, A. Touhafi, G.M. Muntean. – 2020. – Chap. 7. – P. 161–180.
11. Smart cities: advances in research – an information systems perspective / E. Ismagilova, L. Hughes, Y. K. Dwivedi, K. R. Raman // International Journal of Information Management. – 2019. – Vol. 47. – P. 88–100.
12. Суховская, Д. Н. Анализ структуры концепции «умного города» / Д. Н. Суховская, Н. А. Шульгин // E-Scio. – 2019. – № 9(36). – С. 737–746.
13. Камолов, С. Г. Технологии будущего для «умных городов» / С. Г. Камолов, А. М. Корнеева // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Экономика. – 2018. – № 2. – С. 100–114.
14. Yang, R. Smart city development Models: A cross-cultural regional analysis from theory to practice / R. Yang, F. Zhen // Research in Globalization. – 2024. – Vol. 8. – P. 100221 – DOI: 10.1016/j.resglo.2024.100221.
15. Bibri, S. E. A novel model for data-driven smart sustainable cities of the future: A strategic roadmap to transformational change in the era of big data / S. E. Bibri, J. Krogstie // Future Cities and Environment. – 2021. – Vol. 7, no. 1. – P. 1–25.
16. Костина, Е. А. Барьеры использования сервисов обратной связи на муниципальном уровне / Е. А. Костина, А. В. Костин // Журнал Сибирского федерального университета. Гуманитарные науки. – 2023. – Т. 16, № 3. – С. 468–480.

17. Пироцкая, А. В. Концепция «умного города» в представлении экспертов и жителей: проблемы и противоречия в реализации концепции / А. В. Пироцкая // Мир экономики и управления. – 2020. – Т. 20, № 2. – С. 178–196.

18. Kitchin, R. The opportunities, challenges and risks of big data for official statistics / R. Kitchin // *Statistical Journal of the International Association of Official Statistics*. – 2015. – Vol. 31, no. 3. – P. 471–481.

19. A survey of blockchain technology applied to smart cities: Research issues and challenges / X. J. Junfeng, H. Tang, T. Huang [et al.] // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. – 2019. – Vol. 21, iss. 3. – P. 2794–2830.

References

1. Odintsov A. V. *The main risks of implementing the concept of a "smart city"*. Sociodinamika [Sociodynamics], 2019, no. 10, pp. 1–8 (In Russ.). DOI: 10.25136/2409-7144.2019.10.30636.

2. Belarus' v cifrah. Statisticheskij spravochnik 2025. *Belarus in Numbers. Statistical Handbook 2025*. Minsk, Nacional'nyj statisticheskij komitet Respubliki Belarus', 2025, 62 p. (In Russ.).

3. Kostina E. A. *The risks of a smart city*. Mir jekonomiki i upravlenija [The World of Economics and Management], 2023, vol. 23, no. 2, pp. 108–125 (In Russ.). DOI: 10.25205/2542-0429-2023-23-2-108-125.

4. Schwab K., Davis N. *Shaping the Fourth Industrial Revolution*. World Economic Forum, 2018, 287 p.

5. Kupriyanovsky V. P., Alenkov V. V., Sokolov I. A., Zazhigalkin A. V., Klimov A. A., ..., Namiot D. E. Smart infrastructure, physical and information assets, Smart Cities, BIM, GIS and IoT. *International Journal of Open Information Technologies*, 2017, vol. 5, no. 10, pp. 55–86 (In Russ.).

6. Savaget P., Geissdoerfer M., Kharrazi A., Evans S. The theoretical foundations of sociotechnical systems change for sustainability: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, 2019, vol. 206, pp. 878–892. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.09.208.

7. Saak A. E., Tyushnyakov V. N., Pakhomov E. V. *Models of the information technology structure of a smart city*. Fundamental'nye issledovaniya [Fundamental Research], 2017, no. 10-2, pp. 387–391 (In Russ.).

8. Kitchin R. Data-driven, networked urbanism. *Steps*, 2017, vol. 3, no. 2, pp. 98–116.

9. Aliero M. S., Qureshi K. N., Pasha M. F., Jeon G. Smart home energy management systems in internet of things networks for green cities demands and services. *Environmental Technology & Innovation*, 2021, vol. 22. Available at: <https://www.sci-hub.ru/10.1016/j.eti.2021.101443> (accessed 06.17.2024).

10. Frank E., Aznar Fernández-Montesinos G. Smart City = Smart Citizen = Smart Economy? An Economic Perspective of Smart Cities. *Social, Legal, and Ethical Implications of IoT, Cloud, and Edge Computing Technologies, IGI Global, Hershey*. In G. Cornetta, A. Touhafi, G. M. Muntean (eds.), 2020, chap. 7, pp. 161–180.

11. Ismagilova E., Hughes L., Dwivedi Y. K., Raman K. R. Smart cities: advances in research – an information systems perspective. *International Journal of Information Management*, 2019, vol. 47, pp. 88–100.

12. Sukhovskaya D. N., Shulgin N. A. Analysis of the structure of the "smart city" concept. *E-Scio*, 2019, no. 9(36), pp. 737–746 (In Russ.).

13. Kamolov S. G., Korneeva A. M. *Technologies of the future for "smart cities"*. Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. Seriya: Jekonomika [Bulletin of the Moscow State Regional university. Series: Economics], 2018, no. 2, pp. 100–114 (In Russ.).

14. Yang R., Zhen F. Smart city development Models: A cross-cultural regional analysis from theory to practice. *Research in Globalization*, 2024, vol. 8, p. 100221. DOI: 10.1016/j.resglo.2024.100221.

15. Bibri S. E., Krogstie J. A novel model for data-driven smart sustainable cities of the future: A strategic roadmap to transformational change in the era of big data. *Future Cities and Environment*, 2021, vol. 7, no. 1, pp. 1–25.

16. Kostina E. A., Kostin A. V. *Barriers to using feedback services communications at the municipal level*. Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Gumanitarnye nauki [Journal of the Siberian Federal University. Humanities], 2023, vol. 16, no. 3, pp. 468–480 (In Russ.).

17. Pirotskaya A. V. *The concept of a "smart city" in the view of experts and residents: problems and contradictions in the implementation of the concept*. Mir jekonomiki i upravlenija [The world of Economics and Management], 2020, vol. 20, no. 2, pp. 178–196 (In Russ.).

18. Kitchin R. The opportunities, challenges and risks of big data for official statistics. *Statistical Journal of the International Association of Official Statistics*, 2015, vol. 31, no. 3, pp. 471–481.

19. Junfeng X. J., Tang H., Huang T., Yu F. R., Xie R., ..., Liu Y. A survey of blockchain technology applied to smart cities: Research issues and challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2019, vol. 21, iss. 3, pp. 2794–2830.

Информация об авторах

Кругликов Сергей Владимирович, доктор военных наук, кандидат технических наук, доцент, генеральный директор, Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси.

E-mail: kruglikov_s@newman.bas-net.by

Давыдовский Анатолий Григорьевич, кандидат биологических наук, доцент, доцент кафедры микропроцессорных систем и сетей Института информационных технологий БГУИР.

E-mail: agd2011@list.ru

Information about the authors

Sergey V. Kruglikov, D. Sc. (Milit.), Ph. D. (Eng.), Assoc. Prof., Director General, The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus.

E-mail: kruglikov_s@newman.bas-net.by

Anatoly G. Davydovskii, Ph. D. (Biol.), Assoc. Prof., Assoc. Prof. of the Department of Microprocessor Systems and Networks of the Institute of Information Technologies of BSUIR.

E-mail: agd2011@list.ru