

ИНФОРМАЦИОННЫЕ СТРУКТУРЫ УМНОГО ГОРОДА НА ОСНОВЕ КИБЕРФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Бурый А. С.¹, Ловцов Д. А.²

Ключевые слова: умный город, киберфизическая система, комплексный ИКС-подход («информационно-кибернетически-синергетический»), информационные технологии, междисциплинарный метаболизм, интеллектуальный агент, многоагентная система, модель города, правовые протоколы.

Аннотация

Цель работы: совершенствование научной и методической базы концепции интеграции информационных и коммуникационных технологий умного города.

Методы: системный анализ, концептуально-логическое моделирование, формально-логическая разработка и обоснование структур построения распределенных информационных систем.

Результаты: определены приложения основных свойств эргасистем к формированию требований к инфраструктурам умного города; рассмотрены варианты развития системного метаболизма информационных процессов в организационно-управляющих структурах городского хозяйства применительно к задачам формирования функциональных подсистем информационной инфраструктуры умного города за счет фрактального расширения киберфизических элементов и систем на основе разработки многоагентного представления моделей коммуникаций и междисциплинарного метаболизма информационного пространства городской среды; информационное взаимодействие функциональных подсистем умного города представлено как отношения интеллектуальных агентов подсистем обслуживания, инвариантных к уровню представления; соответствующий проблемно-ориентированный концептуальный вариант комплексного ИКС-подхода («информационно-кибернетически-синергетического») можно использовать при структурировании разнородных информационных систем в парадигме цифрового общества.

DOI: 10.21681/1994-1404-2022-4-15-26

Введение

В эпоху высокой «цифровой активности» всех секторов экономики, хозяйствующих субъектов, сфер образования, здравоохранения и др. еще больше укрепилась роль информационно-коммуникационных технологий (ИКТ), как при решении технологических информационно-управляющих задач в автоматизированных системах различного уровня [6, 22], так и в городской инфраструктуре [4, 5] с учетом государственных информационных систем [2] различного назначения: в правовой области [8, 12], в производственной сфере [20, 26], включая интеллектуальные технологии Индустрии 4.0 [28] (умное производство); в области инновационных услуг нового поколения, включая

транспорт, здравоохранение, науку [18], мониторинг окружающей среды, бизнес, торговлю и социальную деятельность [23, 24].

Насыщенная инфраструктура современного города обеспечивает взаимодействие (правовые протоколы) предприятий, организаций, отдельных людей друг с другом, их доступ к информационным ресурсам различного уровня и назначения [4]. Потребность в оперативной, достоверной и доступной информации обеспечивается за счет развития инновационных технологий в государственном секторе, роста числа мобильных устройств, значительно упростивших процессы получения данных, обмен данными, их использование и хранение.

По оценкам сетевой и телекоммуникационной компании *Ericsson*, в 2022 г. по всему миру будет распределено около 29 млрд подключенных устройств,

¹ Бурый Алексей Сергеевич, доктор технических наук, эксперт Российской академии наук, директор департамента ФГБУ «Российский институт стандартизации», г. Москва, Российская Федерация.

E-mail: a.s.burij@gostinfo.ru

² Ловцов Дмитрий Анатольевич, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации, заместитель по научной работе директора Института точной механики и вычислительной техники им. С. А. Лебедева Российской академии наук, заведующий кафедрой информационного права, информатики и математики Российского государственного университета правосудия, г. Москва, Российская Федерация.

E-mail: dal-1206@mail.ru

18 млрд из которых будут напрямую связаны с Интернетом вещей³. Однако важно помнить, что умные города — это, по сути, *эко-города*, в которых учитываются экономические, социальные и экологические факторы воздействия на окружающую среду. На снижение расхода воды, тепла, отходов и энергии, минимизацию загрязнения воды, воздуха, почвы направлены существующие и разрабатываемые инновационные технологии, включая информационные, а также их интеграция для повышения эффективности во многих сферах городской среды. Именно в интеграции современных наук, когда, говоря словами Р. Акоффа, «*в век системной ориентации целое нас интересует больше, чем его части*»⁴, ожидаются наибольшие успехи и технологические прорывы в решении задач устойчивого развития города и экономики в целом.

Города по всему миру должны стать «умнее» в смысле предлагаемых цифровых услуг, для чего городские службы и сервисные платформы вынуждены постоянно развивать новые направления деятельности и цифровых услуг. Для этого целесообразно использование потенциала генерируемых наборов данных в городском *информационном пространстве* [11] в различных секторах социально-экономической среды (транспорт, здравоохранение, образование, безопасность, климатические наблюдения и др.) [7, 9, 17, 25] в ходе цифровой трансформации *инфосферы* общества.

Умная городская инфраструктура, рост беспроводных коммуникационных технологий, удаленных сервисов, *киберфизических систем* (КФС), технологий Интернета вещей и их сетевые объединения [16, 17], обеспечение общественной и *информационной безопасности* [11] составляют основные тренды в реализации ИКТ, способных уже совсем скоро изменить облик городов и качество жизни самих горожан.

Предметной *целью* настоящего исследования является: развитие и проблемная ориентация концептуального варианта комплексного ИКС-подхода («информационно-кибернетически-синергетического») ⁵ [13] к формированию функциональных подсистем информационной инфраструктуры умного города за счет фрактального расширения киберфизических элементов и подсистем на основе разработки многоагентного представления моделей коммуникаций и междисциплинарного метаболизма в информационной городской среде.

³ 4 тренда Интернета вещей на 2022 год. URL: <https://www.fintechnews.org/4-iot-trends-for-2022> (дата обращения: 29.10.2022).

⁴ Акофф Р., Эмери Ф. О целеустремленных системах. М.: Сов. радио, 1974. 272 с. (С. 16).

⁵ Ловцов Д. А. О концепции комплексного подхода // Философские исследования. 2000. № 4. С. 158—174; Информационные аспекты комплексного подхода к исследованию систем управления // НТИ. Сер. 2. Информ. процессы и системы. 1997. № 5. С. 10—17, 32; Концепция комплексного ИКС-подхода к исследованию сложных правозначимых явлений как систем // Философия права. 2009. № 5. С. 40—45.

1. Системный взгляд через призму метаболизма умного города

Город интерпретируется как живой организм, состоящий из человеческих сообществ, живущих в определенной среде и зависящих от нее [21]. *Метаболизм* — заимствованное из естественных наук понятие, предполагающее обмен (энергетический, информационный, био-физико-химический) между живым организмом и средой.

Современный город можно представить как *сетевой организм*, посредством которого осуществляется обмен ресурсами. Однако метаболизм — это не только обмен услугами, продуктами, но и взаимодействие (правовые протоколы) между *агентами* социального пространства, а многостороннее *городское пространство* — это не только территория, но и материальные потоки движения людей, транспорта, ресурсов, информации (данных), товаров (услуг).

Системные трансформации метаболизма

В парадигме устойчивого развития общества следует рассматривать *устойчивость* умного города как сложной диссипативной (от лат. *dissipatio* — рассеяние) системы⁶ в условиях энергетических, информационных и материальных (вещественных) потоков, способной к самоорганизации, в процессе которой потоки трансформируются и эффективно используются. Формируемые при этом данные учитывают основные параметры и структуры информационно-управляющих подсистем города, составляющих понятие *городского метаболизма* (ГМб). Многовариантность устойчивого развития обеспечивается на основе постоянного мониторинга состояния умного города и своевременного выявления противоположных факторов кооперации и конкуренции при взаимодействии элементов самоорганизующейся диссипативной системы, обеспечивающих нелинейный («ветвистый») и необратимый характер развития.

Применение формально-логического аппарата *теории сложных систем* позволяет наиболее адекватно представлять многообразие процессов умного города, включая [3, 4, 10, 11, 26]:

- 1) их разномасштабный характер (временной и пространственный);
- 2) многоуровневость информационных процессов в ходе *рациональной переработки информации*⁷ и принятия решений;

⁶ Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса: новый диалог человека с природой. М.: УРСС, 2005. 320 с. (С. 294).

⁷ В соответствии с базовым «трёхэкстремальным» принципом информационной ценности ИКС-подхода информационный ресурс эргосистемы следует использовать рациональным способом и только для переработки наиболее ценной и качественной информации, на основе которой действительно возможна выработка оптимальных регулирующих решений (воздействий), ведущих к достижению целей регулирования

Сопоставление основных свойств эргасистем и их приложений для инфраструктур умного города

Свойства эргасистем с позиций ИКС- подхода	Приложения для городских инфраструктур
1. Эргасистема как совокупность элементов (агентов), связанных выполнением единой цели	Граждане взаимодействуют на местном уровне с учреждениями и устанавливают социально-экономические отношения
2. Открытость: вещество, энергия и информация могут перетекать через границы эргасистемы	Города — это открытые системы, живущие и развивающиеся за счет потоков энергии, материалов (веществ) и информации
3. Динамичность: непредсказуемые и постоянно создающиеся новые структуры (эмерджентное поведение)	Города — это место, где естественным образом появляются инновации за счет структурной и функциональной многовариантности, отражающей различные аспекты подсистем города
4. Представление любой полной эргасистемы как иерархии структурированных эргасистем, элементами которых являются подсистемы, элементами которых являются уже узлы и т. д.; пространственная и временная масштабность событий	Информационно-коммуникационное взаимодействие согласно правовым протоколам посредством сетевых инфраструктур между гражданами, городскими службами, предприятиями, услугами и отраслями социальной сферы в масштабе города, региона и государства (структуры взаимодействия городских систем можно представить с помощью многослойных сетей)
5. Адаптивность к изменению внутренних и внешних факторов при сохранении целевой эффективности и устойчивости эргасистемы	Городская адаптивность — это способность быстро восстанавливаться и быть устойчивым в развитии, предлагая гостям и жителям города высокий уровень жизни, работы и развлечений при минимальном влиянии на окружающую среду
6. Характеризуется наличием и прогнозированием порогов, конфликтов, катастроф	Примеры проявлений: сбои в инфраструктурных сетях, в практике социальной сегрегации; существование закрытых подсистем
7. Развитие на грани хаоса: поведение не является ни упорядоченным, ни полностью беспорядочным, но реализуется между регулярностью и нерегулярностью	Типичным примером является динамика социальных взаимодействий: с точки зрения инфраструктуры, заторов на дорогах или подачи электроэнергии, обеспечения информационной безопасности (что отдаляет нас от грани хаоса)

- 3) сочетание методов декомпозиции и агрегирования при формировании структур подсистем умного города;
- 4) реализация свойств *адаптации, живучести, отказоустойчивости и безопасности* для поддержания жизнедеятельности города в различных конфликтных ситуациях;
- 5) выявление эмерджентных свойств на основе взаимодействия политической, институциональной и правовой среды, выводящее рассматриваемые проблемы города за рамки получаемых наборов данных, позволяющих формировать новые знания для выработки нетривиальных решений⁸.

В табл. 1 сопоставлены приложения основных свойств эргасистем с позиций ИКС-подхода к формированию *требований* к организационно-техническим и информационным структурам умного города (составлено с учетом [13, 27]).

Метаболизм позволяет управлять объемами городских ресурсов и степенью цикличности их потоков. Так,

⁸ В соответствии с базовым «трёхэкстремальным» принципом информационной ценности ИКС-подхода информационный ресурс эргасистемы следует использовать рациональным способом и только для переработки наиболее ценной и качественной информации, на основе которой действительно возможна выработка оптимальных регулирующих решений (воздействий), ведущих к достижению целей регулирования.

на примере сближения задач циркулярной экономики и Индустрии 4.0, основанного на больших данных⁹, учет экологических и социальных аспектов позволяет существенно *повысить эффективность* использования ресурсов, оптимизировать жизненные циклы продукции, сокращая объемы отходов, тем самым улучшая экологию.

На примере современных производственных процессов рост цифровизации городов находит воплощение в сравнительно новом развитии ГМб — «*умном городском метаболизме*» [30]. По своей сути умный ГМб направлен на наблюдение (оценку, прогнозирование и др.) *информационных* потоков и возрастание воздействия ИКТ на *энергетические* потоки (включая электричество, твердое, жидкое и газообразное топливо) и *материальные* потоки.

Последнее осуществляется за счет цифровых средств и технологий Интернета вещей, индустриального Интернета вещей с соответствующим программным обеспечением (в виде приложений и платформ), формирующих *цифровые площадки* в информационной среде инфосферы, обеспечивающие взаимодействие указанных потоков — информационных, энергетических и материальных (вещественных) [11]. Этот

⁹ Dixit A. Governance institutions and economic activity // American economic review. 2009. Vol. 99. No. 1. Pp. 5–24.

конструктивный процесс будем называть формированием *виртуальных цифровых полей* в информационном пространстве, обеспечивающих телематически¹⁰ данные об объектах управления рассматриваемых метаболических потоков.

Междисциплинарный метаболизм

Следует отметить необходимость развития междисциплинарного научного направления, которое условно можно назвать *урбанистикой* («градологией»). В настоящее время отдельно изучаются проблемы городского транспорта, транспортной инженерии, городской социологии, градостроительства; многие технологические вопросы, например, логистические, отдаются на откуп компаниям по профессиональной принадлежности. Формирование рассматриваемого научного направления должно строиться на принципах структурно-функциональной организации городского механизма, базируясь на основных принципах ИКС-подхода [4, 6, 9, 13], что особенно актуально в условиях значительного роста объемов данных (контрольно-измерительной, осведомляющей, сигнальной, командно-программной и др. информации) в контурах управления городских эргасистем¹¹.

Исследовательские проблемы в прикладной области интеллектуальной устойчивой урбанистики, управляемой данными, по своей сути слишком сложны и динамичны, чтобы их можно было решать в рамках отдельных дисциплин. Расширяя область исследования создаваемого научного направления, мы должны понимать, что, отталкиваясь от новой суммы знаний, потребуются *совершенно новые* законы, концепции, обобщения. Это еще раз подтверждает известное утверждение-лозунг антиредукционизма Фила Андерсона, что «*больше*» — значит «*другое*»¹².

Однако умный урбанизм, предлагая большие возможности для повышения качества жизни, не должен вести к маргинализации определенных групп населения за счет различия между теми, у кого есть доступ к умным приложениям, электронным сервисам (в отношении общественного транспорта, мобильности, здравоохранения, образования, ЖКХ и др.), и теми, у кого его нет. *Проблемы социальной изоляции* в умном урбанизме выходят за рамки доступа к технологиям и включают искажение «реальности города» и городской самобытности — таких как история, чувства, проблемы, знания и траектории существующих городских сообществ.

Управляемый данными интеллектуальный устойчивый урбанизм — это, по сути, стратегическое направ-

ление городского развития на основе поддержки передовых технологий и их новых приложений, особенно Интернета вещей и аналитики *больших данных*. Умный город на самом деле представляет собой социотехническую экосистему людей, технологий, организаций и информации. Надлежащее проектирование и управление данной экосистемой должно строиться на основе междисциплинарной интеграции знаний в области *цифровых технологий* (инженерный аспект, информатика и компьютерные науки), путем обеспечения семантической интероперабельности коммуникаций (научной и технологической) [14, 18], а также устойчивого развития (экономические и экологические аспекты) и социальных стратегий общества.

Городская информатика

Городская информатика — это междисциплинарная область, направленная на изучение, проектирование и практическое использование ряда научных направлений, включая информатику, социологию, городскую инженерию, интеллектуальный анализ данных, информационные системы и технологии, компьютерную инженерию, разработку программного обеспечения и беспроводные сети для задач городского планирования, повышения эффективности и устойчивости управления и качества жизни горожан.

В контексте интеллектуального устойчивого урбанизма, основанного на разнообразных городских данных (например, данных о транспорте и транспортных потоках, о мобильности различных объектов — геолокация, о пространственно-временном состоянии окружающей среды, о городской энергетике и др.), городская информатика предлагает инструментарий, основанный на использовании ИКТ и междисциплинарного научного ИКС-подхода для оптимизации оперативного функционирования города, совершенствования городского управления и планирования.

Как академическая и исследовательская область городская информатика должна быть связана с изучением, проектированием, разработкой и внедрением вычислительных технологий для городских социально-экономических задач. В частности, это касается:

- проектирования и создания систем и приложений, ориентированных на поддержку принятия решений и предоставление услуг для достижения множества городских целей;
- представления, моделирования, обработки и управления различными видами городских данных;
- сбора данных и формирования открытых данных для различных целей;
- разработки и применения методов интеллектуального анализа данных для улучшения и поддержания работы различных приложений ИКТ, что должно способствовать пониманию природы городских явлений и прогнозированию городских изменений и ее динамики.

¹⁰ *Телематика (telematics)* — термин, используемый вместо термина «информационно-компьютерная технология телекоммуникаций».

¹¹ Адекватность комплексного ИКС-подхода обусловлена тем, что все эргасистемы как сложные человеко-машинные системы управления имеют ИКС-природу.

¹² Anderson P. W. More is different // Science. 1972. Vol. 177. No. 4047. Pp. 393–396.

Современная область ИКТ еще не сформирована как традиционная наука, поэтому существуют *риски* и технологические *угрозы*. Развитие данных технологий, их разнообразие значительно опережают научную обоснованность, свойственную классическим теоретическим подходам.

Перспективными направлениями развития городской информатики в настоящее время могут быть:

- разработка и оптимизация стратегии динамичного управления городскими ресурсами, в том числе и на основе разработки систем моделирования;
- теоретическое обоснование и методы формирования открытых баз данных и знаний (БДЗ) о городских моделях и процессах;
- разработка проектов и стандартов комплексирования данных и знаний в ходе их интеграции в городской *информационной среде* [11];
- инновации в городском управлении, планировании и анализе результатов деятельности с учетом спектра методологий социальных и гуманитарных наук, направлений в искусстве, дизайне, архитектуре, применяемых в урбанистике.

2. «Агентное» моделирование городского метаболизма

Существующие структуры городского управления (организационные, информационные и др.) характеризуются сложностью, многофункциональностью, целевым разнообразием. Ранее было предложено представлять умный город как *интегрированную социально-экономическую эргосистему* [4, 5], в которой взаимодействие человеческого и социального капитала основывается на цифровых технологических решениях. Сложная взаимосвязанная информационная структура умного города представляет собой пример *киберфизической системы*, в которой осуществляется непрерывный мониторинг состояния города с помощью датчиков и процессов; получаемые данные анализируются, преобразуются и используются в коммуникациях и в информационном обеспечении при формировании БДЗ систем поддержки и принятии решений.

Таблица 2

Характеристика основных свойств интеллектуального агента

Признаки	Свойства	Описание	Значимость*
Локация	Ситуационность	Агент находится внутри информационной среды и/или является ее частью	1
	Мобильность	Возможность перемещаться по сетям и перемещаться между различными машинами	2
Способности	Автономность	Способность к самостоятельному формированию целей и функционированию с самоконтролем своих действий и внутреннего состояния	1
	Реактивность / восприятие	Способность воспринимать окружающую среду с помощью датчиков, при этом восприятие относится к мгновенному вводу, а последовательность восприятия — к полной истории	1
	Способность к коммуникации	Агенты общаются с другими агентами и даже с людьми	1
	Робастность	Поведение агента не подвержено малым изменениям (колебаниям) в свойствах (состоянии) среды	2
	Гибкость	Способность выполнять широкий круг задач, т. е. агент может выбирать из многочисленных вариантов поведения	2
	Адаптивность	Агент адаптации учится, т. е. использует предыдущий опыт для изменения окружающей среды	2
Поведение	Реактивность	Агент своевременно реагирует на изменения в окружающей среде	1
	Проактивность	Способность проявлять инициативу, т. е. самостоятельно генерировать цели и действовать рационально для их достижения. Агенты следуют процессу обсуждения, который включает рассуждения, планирование, ведение переговоров и координацию с другими агентами	2
	Рациональность	Ожидается, что агенты будут выбирать действия, которые максимизируют их ожидаемую производительность	2
	Тактика	Способность устанавливать множественные цели и вне зависимости от найденных обстоятельств решать, какие частные цели активно преследовать	2
	Социальность	Способность согласовать свое поведение с поведением других агентов в условиях определенной среды, в том числе и выполнение постоянных обязательств	1
*Значимость признака: 1 — существенная; 2 — второстепенная.			

Киберфизическая система (КФС) — это сложная, гетерогенная, распределенная интеллектуальная система, которая включает инженерные взаимодействующие сети физических и вычислительных компонентов, интегрированные для мониторинга и управления физической средой [29].

Процессы управления, планирования, прогнозирования развития городов чрезвычайно трудоемки, поэтому целесообразно воспользоваться методологией моделирования, объединяющей управленческие, нормативные, прогностические и дескриптивные функции. Хорошую возможность для этого предоставляют *много-агентные системы* (МАС), представляющие собой вычислительную парадигму, реализованную в информационном пространстве на инфраструктуре умного города, характеризующегося децентрализацией и распределенностью выполняемых действий на основе автономных агентов. Дальнейшим развитием МАС выступают *агент-ориентированные системы*, которые можно отнести к гибридным системам, так как они могут включать экспертную и обучающую функциональные подсистемы, распределенные объектные приложения и др.

Под *агентами* будем понимать метаобъекты или некоторые интеллектуальные сущности, способные манипулировать другими информационными объектами, формировать собственные программы действий в рамках установленных целей, автономии и уровня доступности данных¹³.

В табл. 2 представлены основные свойства агентов, сгруппированные с учетом выделенных признаков агентов: поведение, способности, локация [4, 25].

Локация (пространственная и/или информационная) предполагает поиск и идентификацию объектов с применением активных физических средств или априорных данных (знаний). Так, для робототехники — это умение ориентироваться в заданном рабочем пространстве (обход препятствий, построение оптимальных маршрутов и др.).

Показатель значимости (см. табл. 2) предполагает оценку *релевантности*¹⁴, указывающую, встречается ли рассматриваемое свойство (в основном в литературе) в качестве существенного или второстепенного.

На основе ИКС-подхода *предлагается* инфраструктуру умного города рассматривать как единую эргасистему, объединяющую множества информационных элементов и связей между ними в соответствии с функциональными признаками в едином информационном пространстве умного города [4, 11].

В качестве структурных узлов, выполняющих функцию объединения информационных элементов, могут выступать отдельные КФС, которые можно рассматривать как некоторые фрактальные структуры. Фрак-

тность в данном случае является методическим свойством объектов (КФС), позволяющим лучше представлять объект при изменении его масштаба [15], т. е. пространственной распределенности, не исключая технологии облачных и туманных вычислений [3]. Так, на уровне отдельных устройств измерительная информация о состоянии элементов физической части (ФЧ) передается в вычислительную часть (ВЧ) КФС, где формируется (рис. 1) решение 2 на управление, т. е. реализацию воздействий 3, элементами, расположенными в физической части. На уровне эргасистемы осуществляется объединение нескольких устройств, а также на общесистемном уровне (или *system of systems* — SoS) возможно объединение нескольких КФС (см. рис. 1)¹⁵. Межуровневое взаимодействие осуществляется на основе человеко-машинных процедур (алгоритмов) управления.

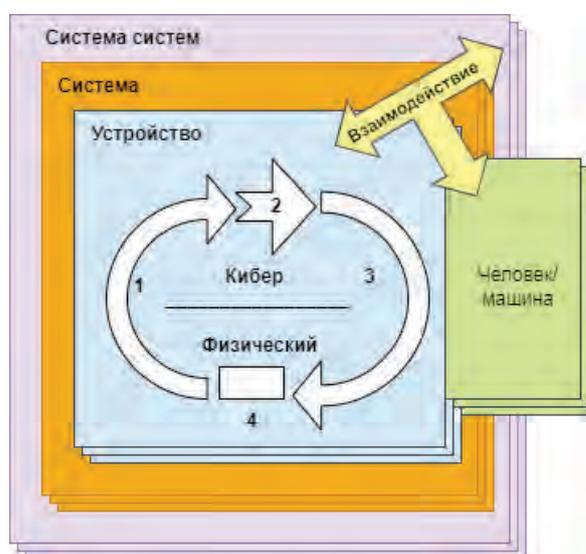


Рис. 1. Концептуальная модель КФС
(1 — информация; 2 — решение;
3 — действие; 4 — физическое состояние)

Вычислительные и коммуникационные средства, включая встраиваемые, коммуникационную инфраструктуру, БДЗ, облачные сервисы, мобильные приложения, составляют *вычислительную часть* КФС [17].

На рис. 2 представлена иерархическая структура *инвариантного контура рационального управления* (ИКРУ) [10] информационной подсистемы умного города, которая может иметь приложение в городском транспорте, здравоохранении, на производстве и др.

Выделим следующие элементы (функциональные подсистемы) ИКРУ [4, 10]:

1 — объект управления (ОУ) любой физической природы (технической, экономической, социальной и др.);

2 — подсистема выработки управляющего (регулирующего) решения (ВР);

¹³ Последнее в объектно-ориентированном программировании называют *инкапсуляцией* (от лат. *in capsula* — «размещение в оболочке»), позволяя связать данные с методами их обработки, выполняемыми данным агентом.

¹⁴ Релевантность (от англ. *relevancy* — соответствие, уместность) — соответствие одного объекта другому.

¹⁵ ПНСТ 416-2020. Система киберфизическая. Общие положения (Введ. с 2020-23-07).

Информационные структуры умного города на основе киберфизических систем

3 — подсистема измерения и первичного преобразования данных (ИП);

4 — подсистема оценивания состояния (ОС) или обработки данных;

5 — подсистема централизованной координации и организационного управления (КУ);

6 — БДЗ постоянного и оперативного хранения данных и знаний.

База данных и знаний служит для хранения целевых параметров управления, результатов оценивания наблюдаемых измерений, а также для поддержки алгоритмов переработки информации.

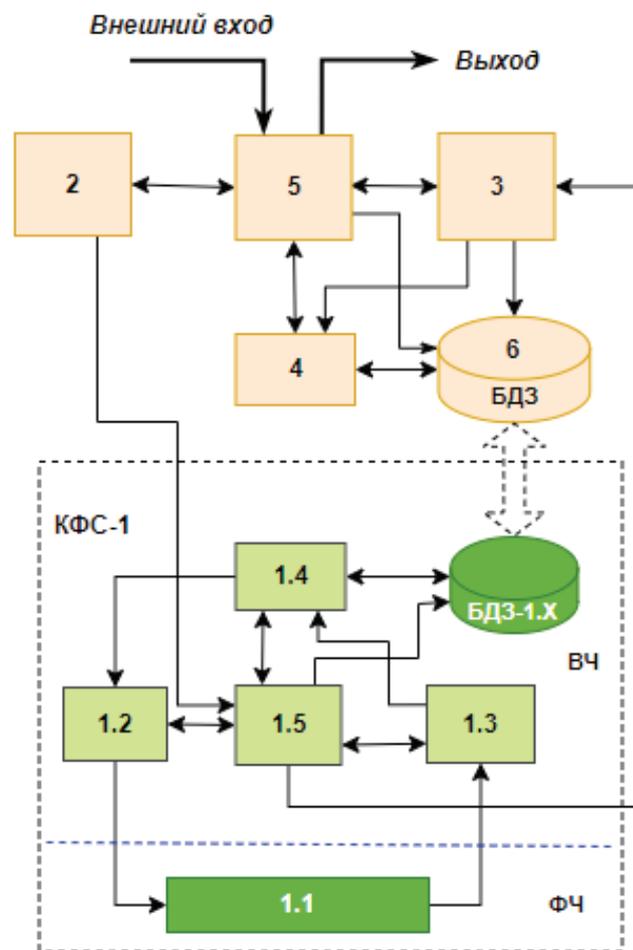


Рис. 2. Структура инвариантного контура рационального управления на основе моделей КФС

Объект управления представляет собой киберфизическую систему (КФС-1 на рис. 2), включающую физическую и вычислительную части. Блоки 1.2—1.5 имеют то же функциональное содержание, что и подсистемы 2—5. Условно показан информационный обмен между БДЗ, который должен предусматривать разнообразные признаки передаваемых данных (по времени, по объему, первичные, экспресс-оценивание и др.).

Для разработки концептуальной модели КФС можно представить ее элементы в виде интеллектуальных агентов, соответствующих функциональному набору (см. рис. 2), составляющих множество $A = \{a\}$, в кото-

ром каждый агент a_t^B уровня B (устройство, подсистема, эргасистема) принадлежит типу t , ($t \in T$), исходя из функционала элементов КФС:

$$T = \{\langle OU \rangle, \langle BP \rangle, \langle OC \rangle, \langle IP \rangle, \langle KU \rangle, \langle BDZ \rangle\}. \quad (1)$$

Агент типа БДЗ отвечает за формирование БДЗ и выдачу данных по запросам. КФС в ходе применения может выполнять ряд частных функциональных задач [10, 12], формируя для этого необходимую конфигурацию элементов, например:

- контроль состояния и запись регистрируемых параметров — задействованы агенты функциональных элементов 3, 4, 6 (БДЗ): режим пассивного контроля;
- контроль состояния и запись регистрируемых параметров в соответствии с программой наблюдения — взаимодействуют интеллектуальные агенты элементов 5, 2, 3, 4, 6: режим программного контроля.

В этом случае возможно говорить о множестве \mathcal{M} конфигураций агентов, элементами которого являются упорядоченные цепочки действий интеллектуальных агентов, соответствующие технологическим процессам (измерения, управления, записи данных, контроля записанной информации, процедур анализа информации и др.):

$$\{U(a_i \circ \dots \circ a_j)\} \in \mathcal{M}, \quad (2)$$

где индексы i и j обозначают различные типы интеллектуальных агентов из множества T , а знак « \circ » — их композицию.

Основные доминирующие технологии цифровой трансформации показаны на рис. 3. Именно они задают векторы инновационных преобразований, формируя единое информационное пространство умного города [5, 12]. Именно интеграция технологий облачных вычислений, больших данных, Интернета вещей (ИВ) и искусственного интеллекта обеспечивает синергетический эффект, например, в транспортном планировании, градостроительстве, при выборе целевой предметной области.

На рис. 3 условно показаны взаимосвязи между названными технологиями:

- ① — формирование разумных машин, компьютерных программ на базе искусственного интеллекта, способных самообучаться и решать проблемы вместо человеческого интеллекта в открытом доступе к соответствующим сервисам облачных вычислений, а также в процедурах и алгоритмах встроенных микропроцессоров в составе приборов ИВ;
- ② — большие данные являются основой для реализации процедур машинного обучения из состава технологий искусственного интеллекта в сервисах облачных вычислений;
- ③ — объекты ИВ, промышленного ИВ, КФС (локальные, а также в составе уровней представления КФС — см. рис. 1) являются источниками формирования массивов БДЗ;
- ④ — формирование настроек устройств ИВ на основании данных точных вычислений (по БДЗ) программными сервисами облачных вычислений;

⑤ — формирование информационного взаимодействия информационных систем умного города за счет их интеграции для решения своих целевых задач, включая задачу формирования БДЗ данной предметной области.

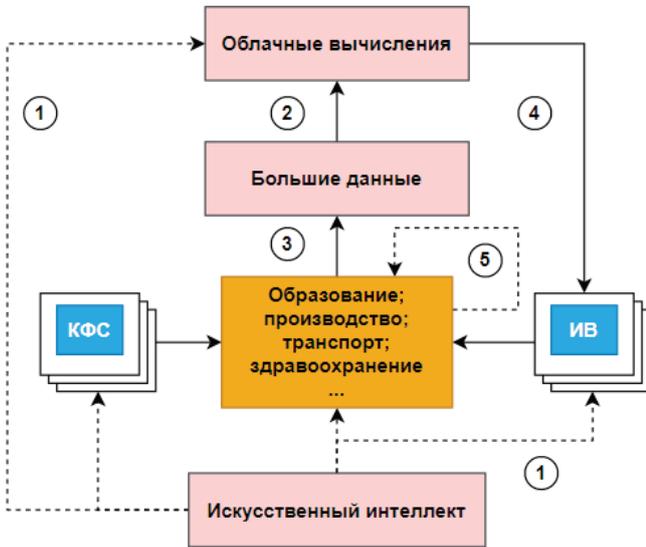


Рис. 3. Вариант взаимодействия цифровых технологий

Рассмотренные варианты технологического взаимодействия на базе агентного представления укладываются в логику выражения (2) и могут быть формализованы в виде следующего кортежа:

$$Int = \langle A, T, Pr \rangle, \quad (3)$$

где Int — взаимодействие (*interaction*) агентов из множества A ; T — множество типов агентов из (1); Pr — множество программ (стандартов) взаимодействия между агентами, реализуя подход, представленный на рис. 3;

$$Pr = (Com, \pi), \quad (4)$$

где Com — множество коммуникативных действий между интеллектуальными агентами ($a_5 \rightarrow a_2$; $a_3 \rightarrow a_5$; $a_5 \rightarrow a_4$ и др.); π — правовые протоколы типовых действий (запись информации, копирование данных, передача данных, отображение и др.).

Процессы взаимодействия элементов информационной структуры умного города можно представить как *многоагентную систему* в виде обобщенной *концептуально-логической модели* [19]:

$$MAS = (A, E, R, \mathcal{M}, St_{ORG}, EV), \quad (5)$$

где $A = \{a_i\}$ — множество разнотипных агентов с учетом (1) и (2), $i = \overline{1, N}$; $E = E_1 \times \dots \times E_v \times \dots \times E_V = \{e_k\}$; $k = \overline{1, K}$ — пространство состояний среды (информационного пространства), в которой находится MAS; $K = \prod_v^V |E_v|$ — общее число состояний, определяется с учетом мощностей связанных множеств соответствующих предметных областей (ПрО), в каждой из которых может функционировать своя *информационная подсистема* (в общей информационной структуре умного города); $v = \overline{1, V}$ — счетное число ПрО;

\mathcal{M} — множество конфигураций агентов с учетом объема действий, определяемых функционалом выделенных подсистем (см. рис. 2);

$St_{ORG} = \{st_j\}$, $j = \overline{1, S}$ — множество организационно-информационных структур (в общем случае);

EV — множество стратегий развития городской инфраструктуры и технологий информационного взаимодействия существующих и перспективных предметных областей;

R — семейство базовых отношений между агентами, включающее объединение следующих типов отношений [4, 19]:

$$R = \bigcup_z R_z, \quad z = 1, 2, 3, 4, \quad (6)$$

где R_1 — подмножество горизонтальных отношений между функциональными элементами одного уровня для заданной ПрО; R_2 — подмножество ассиметричных отношений в соответствии с иерархией управления, например, относительно подсистем 5 централизованной координации и организационного управления; $R_2 = \{5^I \rightarrow 5^{II} \rightarrow 5^{III} \rightarrow \dots\}$ — верхний индекс есть уровень управления в направлении «сверху вниз»; $R_3 = \{\dots \rightarrow 5^{III} \rightarrow 5^{II} \rightarrow 5^I\}$ — подмножество ассиметричных отношений в соответствии с иерархией управления на примере подсистемы 5, направленных «снизу вверх»; R_4 — подмножество межпредметных отношений (между различными ПрО), так, при предоставлении данных i -й ПрО для j -й ПрО взаимодействие обеспечивается агентами подсистем 5 и 6 выбранных областей:

$$R_4 = \{[a_6 \rightarrow a_5]_i \rightarrow [a_5 \rightarrow a_6]_j\}, \quad (7)$$

где $i, j = \overline{1, V}$ и $i \neq j$, что характерно, например, при запросе данных ресурса «Госуслуги» лечебными учреждениями системы здравоохранения.

Учет подобных коллабораций (7) позволит уточнить объем множества конфигураций агентов \mathcal{M} для общегородского масштаба модели.

Интеллектуальный агент, в отличие от обычного (реактивного) агента, формирует свои коммуникативные действия (4) в виде функции поведения внешней среды [1]:

$$Env: V \times Com \rightarrow 2^V \quad (8)$$

Здесь функция поведения внешней среды соотносит текущему состоянию внешней среды из множества V и выбранному агентом действию непустое множество следующих состояний внешней среды, т. е. действия интеллектуального агента могут влиять на смену состояний среды, но не контролировать ее полностью.

Если обозначить множество внутренних состояний интеллектуального агента как In , отображение вида:

$$f_{IPR}: In \rightarrow Com$$

можно называть функцией принятия решения интеллектуального агента. В данном случае функция f_{IPR} сопоставляет текущее состояние агента некоторому действию из множества возможных его действий.

Вопросы формирования множества действий агентов и функций принятия решений требуют создания адекватных моделей как самих предметных областей исследования, так и интегрированных на

их основе информационных пространств, предварительного формирования соответствующих им БДЗ, формализации процессов рассуждений, желаний и других когнитивных функций агентов. Развитие проблемно-ориентированного концептуального варианта комплексного ИКС-подхода к формированию будущего облика развивающихся структур (подсистем) на основе МАС позволяет на ранней стадии проекта сформировать общие требования к проектируемой эргасистеме.

Заключение

Таким образом, информационные потоки являются объединяющим фактором, влияющим на метаболические потоки и цифровую интеграцию городских инфраструктур, усиливая их устойчивость и взаимозависимость.

Урбанистика — это не попытка провести грубые аналогии или неопределенные метафоры между социальными и природными системами. Существующие представления могут быть пересмотрены с учетом новых теоретических построений и эмпирических наблюдений. При этом, как любая наука, урбанистика генерирует новые вопросы, требуя от исследователей поиска ответов на них.

Умные города — это новый вид интеграции информационных и коммуникационных технологий. Развитие *агентного моделирования* является хорошим инструментом создания междисциплинарных баз данных и знаний, необходимых для развития проблемно-ориентированного концептуального варианта ИКС-подхода при разработке *цифровой среды* как совокупности цифровых площадок с дифференциацией по предметным областям — по видам деятельности (обучение, проектирование, конструирование, производство и др.).

Рецензент: Цимбал Владимир Анатольевич, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, профессор кафедры автоматизированных систем боевого управления Филиала Военной академии им. Петра Великого, г. Серпухов, Российская Федерация.

E-mail: tsimbalva@mail.ru

Литература

1. Бугайченко Д.Ю. Разработка и реализация методов формально-логической спецификации самонастраивающихся мультиагентных систем с временными ограничениями : дисс. ... канд. физ.-мат. наук. СПб, 2007. 259 с.
2. Бурый А.С. Совершенствование государственных информационных систем как тренд цифрового общества // Правовая информатика. 2020. № 3. С. 19—28. DOI: 10.21681/1994-1404-2020-3-19-28 .
3. Бурый А.С. Тенденции развития распределенных информационных систем на основе облачных технологий // Транспортное дело России. 2013. № 6. С. 160—162.
4. Бурый А.С., Ловцов Д.А. Информационные технологии цифровой трансформации умных городов // Правовая информатика. 2022. № 2. С. 4—13. DOI: 10.21681/1994-1404-2022-2-04-13 .
5. Бурый А.С., Ловцов Д.А. Перспективы стандартизации информационного пространства умного города // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. 2022. № 2 (66). С. 4—11.
6. Бурый А.С., Лобан А.В., Ловцов Д.А. Модели сжатия массивов измерительной информации в автоматизированной системе управления // Автоматика и телемеханика. 1998. № 5. С. 3—26.
7. Ватаманюк И.В., Яковлев Р.Н. Обобщенные теоретические модели киберфизических систем // Изв. Юго-Западного гос. ун-та. 2019. Т. 23. № 6. С. 161—175. DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-6-161-175 .
8. Дмитрик Н.А. Цифровая трансформация: правовое измерение // Правоведение. 2019. Т. 63. № 1. С. 28—46. DOI: 10.21638/spbu25.2019.102 .
9. Козлов А.В. Транспортные киберфизические системы как результат развития технологии Интернета вещей // Наука и технологии железных дорог. 2021. Т. 5. № 1 (17). С. 11—21.
10. Ловцов Д.А. Информационная теория эргасистем : монография. М. : РГУП, 2021. 314 с. ISBN 978-5-93916-887-8.
11. Ловцов Д.А. Теория защищенности информации в эргасистемах : монография. М. : РГУП, 2021. 276 с. ISBN 978-5-93916-896-0.
12. Ловцов Д.А. Эффективность правовых эргасистем в инфосфере // Правовая информатика. 2020. № 1. С. 4—14. DOI: 10.21681/1994-1404-2020-1-04-14 .
13. Ловцов Д.А. Современная концепция комплексного ИКС-подхода к анализу и оптимизации правовых эргасистем // Правосудие/Justice. 2020. Т. 2. № 1. С. 59—81. DOI: 10.37399/issn2686-9241.2020.1.59-81 .
14. Макаренко С.И., Соловьева О.С. Основные положения концепции семантической интероперабельности сетцентрических систем // Журнал радиоэлектроники. 2021. № 4. DOI: 10.30898/1684-1719.2021.4.10 .
15. Массель Л.В. Фрактальный подход к структурированию знаний и примеры его применения // Онтология проектирования. 2016. Т. 6. № 2 (20). С. 149—161. DOI: 10.18287/2223-9537-2016-6-2-149-161 .

16. Мокрова Н.В. Концептуальный подход к проблематике умных городов // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 7. С. 32—40. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.07.32-40 .
17. Платунов А., Пинкевич В. Создание киберфизических систем: проблемы подготовки ИТ-специалистов // Control Engineering Россия. 2021. № 3 (93). С. 64—70.
18. Райков А.Н., Жабинская В.П., Перескоков И.С., Табаков К.В. Интегрированная информационная система в сфере науки для поддержки междисциплинарных коллабораций // Цифровая экономика. 2022. № 3 (19). С. 35—44. DOI: 10.34706/DE-2022-03-04 .
19. Тарасов В.Б. От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика. М. : Эдиториал УРСС, 2002. 352 с.
20. Швецов А.Н. Агентно-ориентированные системы: от формальных моделей к промышленным приложениям // Всероссийский конкурсный отбор обзорно-аналитических статей по приоритетному направлению «Информационно-телекоммуникационные системы» : электронное издание. М. : ФГУ ГНИИ ИТТ «Информика», 2008. 101 с.
21. Яницкий О.Н. Метаболическая концепция современного города // Социологическая наука и социальная практика. 2013. № 3 (03). С. 016—032.
22. Buryi A.S. Structure complexity of distributed information-control systems // Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Teoriya i Sistemy Upravleniya. 1994. No. 5. Pp. 160–167.
23. Cassandras C.G. Smart cities as cyber-physical social systems // Engineering. 2016. Vol. 2. No. 2. Pp. 156–158.
24. Chiariotti F. Condoluci M., Mahmoodi T., Zanella A. SymbioCity: Smart cities for smarter networks // Transactions on Emerging Telecommunications Technologies. 2018, 29, e3206.
25. Herrera M., Pérez-Hernández M., Parlikad A.K., Izquierdo J. Multi-agent systems and complex networks: Review and applications in systems engineering // Processes. 2020. Vol. 8. No. 3: 312. DOI: 10.3390/pr8030312 .
26. Lom M., Pribyl O. Smart City Model Based on Systems Theory // International Journal of Information Management. 2021. Vol. 56. Art. no. 102092. DOI: 10.1016/j.ijinfomgt.2020.102092 .
27. Maranghi S., Parisi M.L., Facchini A., Rubino A., Kordas O., Basosi R. Integrating urban metabolism and life cycle assessment to analyse urban sustainability // Ecological indicators. 2020. Vol. 112 (2). Art. no. 106074. DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.106074 .
28. Oztemel E., Gursev S. Literature review of Industry 4.0 and related technologies // Journal of Intelligent Manufacturing. 2020. No. 31. P. 127–182. DOI: 10.1007/s10845-018-1433-8 .
29. Puliafito A., Tricomi G., Zafeiropoulos A., Papavassiliou S. Smart cities of the future as cyber physical systems: Challenges and enabling technologies // Sensors. 2021. Vol. 21. No. 10. P. 3349. DOI: 10.3390/s21103349 .
30. Shahrokni H., Årman L., Lazarevic D., Nilsson A., Brandt N. Implementing smart urban metabolism in the Stockholm royal seaport – smart city SRS // Journal of Industrial Ecology. 2015. Vol. 19 (5). Pp. 917–929. DOI: 10.1111/jiec.12308 .

INFORMATION STRUCTURES OF THE SMART CITY BASED ON CYBER-PHYSICAL SYSTEMS

Aleksei Buryi, *Dr.Sc. (Technology), expert at the Russian Academy of Sciences, Department Director at the Russian Standardisation Institute, Moscow, Russian Federation.*
E-mail: a.s.burij@gostinfo.ru

Dmitrii Lovtsov, *Dr.Sc. (Technology), Professor, Honoured Scientist of the Russian Federation, Deputy Director for Research of the Lebedev Institute of Precision Mechanics and Computer Engineering of the Russian Academy of Sciences, Head of the Department of Information Technology Law, Informatics and Mathematics of the Russian State University of Justice, Moscow, Russian Federation.*
E-mail: dal-1206@mail.ru

Keywords: *smart city, cyber-physical system, multi-faceted information, cybernetics and synergetics approach, information technology, interdisciplinary metabolism, intelligent agent, multi-agent system, model of the city, legal protocols.*

Abstract

Purpose of the paper: improving the research and methodological basis for the concept of integrating the information and communication technologies of the smart city.

Methods used: system analysis, conceptual logical modelling, formal logical development and justification of structures for building distributed information systems.

Findings. Applications of the main properties of ergasystems to the development of requirements for smart city

infrastructures are identified. Different variants of development of the system metabolism of information processes in the organisation and management structures of city economy are considered in reference to the tasks of building functional subsystems information infrastructures of the smart city using fractal extension of cyber-physical elements and systems based on the development of a multi-agent representation of models for communication and interdisciplinary metabolism of the information space of the city environment. The information interaction of functional subsystems of the smart city is presented as relations between intelligent agents of servicing systems invariant to the presentation level. The appropriate problem-oriented conceptual variant of the multi-faceted information, cybernetics and synergetics (ICS) approach can be used for structuring heterogeneous information systems in the digital society paradigm.

References

1. Bugaichenko D.Iu. Razrabotka i realizatsiia metodov formal'no-logicheskoi spetsifikatsii samonastravaiushchikhsia mul'tiagentnykh sistem s vremennymi ogranicheniiami : diss. ... kand. fiz.-mat. nauk. SPb, 2007. 259 pp.
2. Buryi A.S. Sovershenstvovanie gosudarstvennykh informatsionnykh sistem kak trend tsifrovogo obshchestva. Pravovaia informatika, 2020, No. 3, pp. 19–28. DOI: 10.21681/1994-1404-2020-3-19-28 .
3. Buryi A.S. Tendentsii razvitiia raspredelennykh informatsionnykh sistem na osnove oblachnykh tekhnologii. Transportnoe delo Rossii, 2013, No. 6, pp. 160–162.
4. Buryi A.S., Lovtsov D.A. Informatsionnye tekhnologii tsifrovoi transformatsii umnykh gorodov. Pravovaia informatika, 2022, No. 2, pp. 4–13. DOI: 10.21681/1994-1404-2022-2-04-13 .
5. Buryi A.S., Lovtsov D.A. Perspektivy standartizatsii informatsionnogo prostranstva umnogo goroda. Informatsionno-ekonomicheskie aspekty standartizatsii i tekhnicheskogo regulirovaniia, 2022, No. 2 (66), pp. 4–11.
6. Buryi A.S., Loban A.V., Lovtsov D.A. Modeli szhatiia massivov izmeritel'noi informatsii v avtomatizirovannoi sisteme upravleniia. Avtomatika i telemekhanika, 1998, No. 5, pp. 3–26.
7. Vatamaniuk I.V., Iakovlev R.N. Obobshchennye teoreticheskie modeli kiberfizicheskikh sistem. Izv. Iugo-Zapadnogo gos. un-ta, 2019, t. 23, No. 6, pp. 161–175. DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-6-161-175 .
8. Dmitrik N.A. Tsifrovaia transformatsiia: pravovoe izmerenie. Pravovedenie, 2019, t. 63, No. 1, pp. 28–46. DOI: 10.21638/spbu25.2019.102 .
9. Kozlov A.V. Transportnye kiberfizicheskie sistemy kak rezul'tat razvitiia tekhnologii interneta veshchei. Nauka i tekhnologii zheleznykh dorog, 2021, t. 5, No. 1 (17), pp. 11–21.
10. Lovtsov D.A. Informatsionnaia teoriia ergasistem : monografiia. M. : RGUP, 2021. 314 pp. ISBN 978-5-93916-887-8.
11. Lovtsov D.A. Teoriia zashchishchennosti informatsii v ergasistemakh : monografiia. M. : RGUP, 2021. 276 pp. ISBN 978-5-93916-896-0.
12. Lovtsov D.A. Effektivnost' pravovykh ergasistem v infosfere. Pravovaia informatika, 2020, No. 1, pp. 4–14. DOI: 10.21681/1994-1404-2020-1-04-14 .
13. Lovtsov D.A. Sovremennaia kontseptsiiia kompleksnogo "IKS"-podkhoda k analizu i optimizatsii pravovykh ergasistem. Pravosudie/Justice, 2020, t. 2, No. 1, pp. 59–81. DOI: 10.37399/issn2686-9241.2020.1.59-81 .
14. Makarenko S.I., Solov'eva O.S. Osnovnye polozheniia kontseptsii semanticheskoi interoperabel'nosti setetsentricheskikh sistem. Zhurnal radioelektroniki, 2021, No. 4. DOI: 10.30898/1684-1719.2021.4.10 .
15. Massel' L.V. Fraktal'nyi podkhod k strukturirovaniu znaniia i primery ego primeneniia. Ontologiiia proektirovaniia, 2016, t. 6, No. 2 (20), pp. 149–161. DOI: 10.18287/2223-9537-2016-6-2-149-161 .
16. Mokrova N.V. Kontseptual'nyi podkhod k problematike umnykh gorodov. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo, 2020, No. 7, pp. 32–40. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.07.32-40 .
17. Platunov A., Pinkevich V. Sozdanie kiberfizicheskikh sistem: problemy podgotovki IT-spetsialistov. Control Engineering Rossiia, 2021, No. 3 (93), pp. 64–70.
18. Raikov A.N., Zhabinskaia V.P., Pereskokov I.S., Tabakov K.V. Integrirovannaia informatsionnaia sistema v sfere nauki dlia podderzhki mezhdistsiplinarnykh kollaboratsii. Tsifrovaia ekonomika, 2022, No. 3 (19), pp. 35–44. DOI: 10.34706/DE-2022-03-04 .
19. Tarasov V.B. Ot mnogoagentnykh sistem k intellektual'nym organizatsiiam: filosofii, psikhologii, informatika. M. : Editorial URSS, 2002. 352 pp.
20. Shvetsov A.N. Agentno-orientirovannye sistemy: ot formal'nykh modelei k promyshlennym prilozheniiam. Vserossiiskii konkursnyi otbor obzorno-analiticheskikh statei po prioritetonu napravleniiu "Informatsionno-telekommunikatsionnye sistemy" : elektronnoe izdanie. M. : FGU GNII ITT "Informika", 2008. 101 pp.
21. Ianitskii O.N. Metabolicheskaiia kontseptsiiia sovremennogo goroda. Sotsiologicheskaiia nauka i sotsial'naia praktika, 2013, No. 3 (03), pp. 016–032.
22. Buryi A.S. Structure complexity of distributed information-control systems. Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Teoriya i Sistemy Upravleniia. 1994. No. 5. Pp. 160–167.
23. Cassandras C.G. Smart cities as cyber-physical social systems. Engineering. 2016. Vol. 2. No. 2. Pp. 156–158.
24. Chiariotti F., Condoluci M., Mahmoodi T., Zanella A. SymbioCity: Smart cities for smarter networks. Transactions on Emerging Telecommunications Technologies. 2018, 29, e3206.

25. Herrera M., Pérez-Hernández M., Parlikad A.K., Izquierdo J. Multi-agent systems and complex networks: Review and applications in systems engineering. *Processes*. 2020. Vol. 8. No. 3: 312. DOI: 10.3390/pr8030312 .
26. Lom M., Pribyl O. Smart City Model Based on Systems Theory. *International Journal of Information Management*. 2021. Vol. 56. Art. no. 102092. DOI: 10.1016/j.ijinfomgt.2020.102092 .
27. Maranghi S., Parisi M.L., Facchini A., Rubino A., Kordas O., Basosi R. Integrating urban metabolism and life cycle assessment to analyse urban sustainability. *Ecological indicators*. 2020. Vol. 112 (2). Art. no. 106074. DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.106074 .
28. Oztemel E., Gursev S. Literature review of Industry 4.0 and related technologies. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2020. No. 31. P. 127–182. DOI: 10.1007/s10845-018-1433-8 .
29. Puliafito A., Tricomi G., Zafeiropoulos A., Papavassiliou S. Smart cities of the future as cyber physical systems: Challenges and enabling technologies. *Sensors*. 2021. Vol. 21. No. 10. P. 3349. DOI: 10.3390/s21103349 .
30. Shahrokni H., Årman L., Lazarevic D., Nilsson A., Brandt N. Implementing smart urban metabolism in the Stockholm royal seaport – smart city SRS. *Journal of Industrial Ecology*. 2015. Vol. 19 (5). Pp. 917–929. DOI: 10.1111/jiec.12308 .