

УДК 519.876.5; 004.942

JEL C55

DOI 10.25205/2542-0429-2020-20-3-5-26

Проблемы создания мультиагентной системы поддержки принятия решений на субфедеральном уровне

В. И. Суслов¹, В. С. Костин¹, Е. Ю. Иванов², Н. М. Ибрагимов^{1,2}
Т. С. Новикова¹, А. А. Цыплаков^{1,2}

¹ *Институт экономики и организации промышленного производства СО РАН
Новосибирск, Россия*

² *Новосибирский национальный исследовательский государственный университет
Новосибирск, Россия*

Аннотация

В статье обсуждаются проблемы разработки мультиагентной информационной системы моделирования экономики региона (МАСМЭР), в которой реализуются геоинформационные и агентно-ориентированные подходы к моделированию экономического пространства, а также к исследованию и прогнозированию свойств возникающих пространственных систем и путей их возникновения.

МАСМЭР предлагает организационную систему и общедоступный инструментарий, позволяющие внедрить современные цифровые технологии и агент-ориентированный подход в моделирование экономики реального региона, задает инновационный импульс научному и научно-техническому взаимодействию, проведению совместных исследований в удаленном доступе за счет предоставления общедоступных сервисов, модулей и алгоритмов, а также позволяет органам власти и коммерческим и некоммерческим организациям планировать и отслеживать различные проекты, реализуемые для рассматриваемой территории.

Ключевые слова

мультиагентная система, государственное управление, экономика региона, агент-ориентированное моделирование, информатизация, геоинформационная система.

Источник финансирования

Статья представляет результаты проекта «Агент-ориентированные пространственные системы поддержки принятия решений на региональном уровне», осуществленного при финансовой поддержке РФФИ по гранту 19-410-540002

Для цитирования

Сулов В. И., Костин В. С., Иванов Е. Ю., Ибрагимов Н. М., Новикова Т. С., Цыплаков А. А. Проблемы создания мультиагентной системы поддержки принятия решений на субфедеральном уровне // Мир экономики и управления. 2020. Т. 20, № 3. С. 5–26. DOI 10.25205/2542-0429-2020-20-3-5-26

© В. И. Суслов, В. С. Костин, Е. Ю. Иванов, Н. М. Ибрагимов,
Т. С. Новикова, А. А. Цыплаков, 2020

Problems of Development of Multi-Agent Decision Support System at the Sub-Federal Level

V. I. Suslov¹, V. S. Kostin¹, E. Yu. Ivanov², N. M. Ibragimov^{1,2}
T. S. Novikova^{1,2}, A. A. Tsyplakov^{1,2}

¹*Institute of Economics and Industrial Engineering SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation*

²*Novosibirsk National Research State University
Novosibirsk, Russian Federation*

Abstract

The article reveals the problems which may arise in the development of multi-agent information systems for modeling regional economy (MASMRE) based on geographic information and agent-based approaches to modeling economic space as well as to studying and forecasting the specifics of emerging spatial systems and the ways these systems may occur.

MASMRE proposes an organizational system and open source tools to implement modern digital technologies and also an agent-based approach to modeling the regional economy, which helps to sustain innovative momentum for scientific and scientific-technical interaction, conduct joint research in remote access by providing accessible services, modules and algorithms, and allows the local governments, businesses and non-profit organizations to plan and monitor various projects implemented in a particular territory.

Keywords

multi-agent system, public administration, regional economy, agent-based modeling, informatization, geographic information system

Funding

Article presents the results of the research project “Agent-based spatial decision support systems at the regional level” carried out with financial support of RFBR, project number 19-410-540002

For citation

Suslov V. I., Kostin V. S., Ivanov E. Yu., Ibragimov N. M., Novikova T. S., Tsyplakov A. A. Problems of Development of Multi-Agent Decision Support System at the Sub-Federal Level. *World of Economics and Management*, 2020, vol. 20, no. 3, p. 5–26. (in Russ.) DOI 10.25205/2542-0429-2020-20-3-5-26

Введение

Принятие административно-управленческих решений в современных условиях не может обойтись без сбора большого объема информации и ее последующего оперативного анализа. Информация всегда играла важную роль в государственном управлении, однако в современных условиях, когда уровень информатизации и цифровизации растет возрастающим темпом, роль информационного обеспечения в принятии административно-управленческих решений становится определяющей. Сегодня нельзя утверждать, что государственные органы стоят на переднем крае процесса цифровизации в России. В то же время понятно, что качество административно-управленческих решений существенным образом зависит от возможностей используемых инструментов, в частности информационной инфраструктуры. Люди могут сравнивать качество работы государственных органов и качество предоставляемых государством услуг с качеством работы и качеством услуг негосударственного сектора. Таким образом, по объективным причинам темпы цифровой трансформации в деятельности органов государственного управления не мо-

гут сильно отставать от темпов цифровой трансформации в негосударственном секторе.

Разработка мультиагентных / многоагентных систем (МАС) характеризовалась разнонаправленной динамикой значительных подъемов и спадов, характерных для распространения инновационных технологий. Соответствующие исследования начались в 80-е гг. XX в., стали быстро распространяться с 90-х гг. вплоть до 2008 г., затем резко замедлились в 2010-е гг. и в последнее время снова активизировались с переходом к стабильному росту. Указанные тенденции детально проанализированы в обзорах Лака [1] и Городецкого [2].

Новая информационная технология оказалась эффективной парадигмой поддержки принятия решений благодаря ряду отличительных особенностей, прежде всего, сочетанию возможностей искусственного интеллекта и распределенного контроля. МАС представляет собой распределенную систему, состоящую из множества агентов, которые способны воспринимать ситуацию путем получения информации от внешней среды и взаимодействуют друг с другом на основе сетевого механизма для совместного решения проблем, находящихся вне их индивидуальных возможностей или знаний.

С одной стороны, агентный подход позволяет создавать системы, которые являются гибкими, надежными и могут адаптироваться к окружающей среде. Это особенно полезно, когда компоненты системы неизвестны заранее, меняются со временем и неоднородны. Каждый агент воспринимает состояние окружающей среды, обновляет свои внутренние знания в соответствии с новой полученной информацией, принимает решения о своих действиях и действует, изменяя состояние окружающей среды [3, с. 51]. Важной особенностью агентов является их представление как мотивированных объектов, «живущих» и «действующих» в сложных динамических и виртуальных средах [4, с. 32].

С другой стороны, МАС создает возможности децентрализовать вычислительные решения путем включения автономии и интеллекта в совместные распределенные приложения. В технологии МАС программирование взаимодействий компонент программ отделено от программирования агентов и реализуется с помощью диалогов и протоколов [2]. В литературе отмечаются следующие преимущества: специфические качества участников и окружающей среды учитываются индивидами при принятии решений; локальные взаимодействия между агентами могут моделироваться и исследоваться; трудности моделирования и вычислений разнятся на уровни и компоненты [5]; обеспечивается возможность интеграции информации из нескольких гетерогенных автономных образований [6].

Применение МАС возникло на определенном этапе развития методов распределенных вычислений, предполагающих совместную работу нескольких свободных связанных процессоров для решения общей проблемы. К распределенным вычислениям, разработанным в последние десятилетия, относятся программирование Socket, удаленные вызовы процедур (RPC), объектно-ориентированные системы DCE, DCOM, CORBA, Java RMI и ориентированные на сообщения системы (MOM). При проектировании надежных сетевых приложений указанного типа возникают два основных ограничения [7]. Во-первых, взаимодействие между участниками априори фиксируется посредством точно закодированных инструкций разработчика. В результате им не хватает адаптивного поведения во время выпол-

нения. Во-вторых, постоянное взаимодействие требует постоянной коммуникации, что делает их непригодными для приложений в средах, где поддержание непрерывной связи является дорогостоящим или неосуществимым, а соединение ненадежным. Эти причины привели к разработке подходов к распределенным вычислениям на основе таких агентов, которые обеспечивают способы поддержания постоянного взаимодействия без постоянного общения [8]. МАС и связанные с ними технологии создают возможности для проектирования распределенных сетевых приложений, в которых задействованы многие относительно автономные, гетерогенные объекты [9].

Наиболее известное применение МАС в экономике связано с использованием на фондовых рынках [10–12]. Отдельное направление образует применение для имитации фондового рынка нейронных сетей [13]. Каждая коалиция агентов рассматривается как игрок в игре и оптимизируется путем постоянной адаптации архитектуры агентов посредством использования генетических алгоритмов. Предлагаемая процедура была реализована для имитации торговли акциями. МАС разрабатываются в отдельных отраслях, особенно часто в энергетике. Montoya и Ovalle [14] применяли их для оценки потребления энергии на основе внутренних беспроводных сенсорных сетей. Liu et al. [15] успешно применяли МАС к участию в торгах как механизм на аукционе с электричеством. Khalilian [16] применял подход МАС в интеллектуальном анализе данных с помощью интеллектуального советника. Пространственный аспект МАС наиболее детально представлен объединением географических информационных систем (ГИС) и пространственного анализа при создании системы CyberGIS, использующей распределенные информационные и коммуникационные технологии для скоординированного открытия знаний [17].

1. Постановка проблемы принятия административно-управленческих решений в цифровой экономике

Цифровизация и информатизация ряда областей государственного управления (например, налоговая служба, регистрация недвижимого и движимого имущества, миграционная служба, здравоохранение, проч.) уже достигли достаточно высокого уровня, и теперь стоит задача интеграции потоков данных и процессов ежедневного принятия административно-управленческих решений. При этом современные цифровые технологии могут использоваться для достижения целого ряда важных целей, таких как:

- снижение трудоемкости рутинных операций по сбору, хранению и передаче информации;
- улучшение информационной поддержки и повышение обоснованности принимаемых государственными органами решений за счет использования более качественных, своевременных и подробных данных;
- алгоритмическая поддержка в разработке государственной политики, повышение эффективности использования тех ресурсов, использование которых находится в ведении органов государственного управления, снижение влияния человеческого фактора;

- синхронизация совместной работы разных уровней административно-управленческой иерархии, отслеживание потребностей и нужд нижестоящих управляющих органов, контроль качества их работы;
- синхронизация совместной работы государственных органов и негосударственного сектора, отслеживание потребностей и нужд бизнеса и некоммерческих организаций, обеспечение прозрачности и некоррупционности во взаимоотношениях государственных органов и негосударственного сектора;
- мониторинг качества жизни, обеспечение обратной связи и мониторинг удовлетворенности населения объемом и качеством предоставления государственных услуг;
- обеспечение гибкости, персонализации и своевременности при предоставлении государственных услуг, учет актуальных потребностей населения и бизнеса.

В то же время, не следует забывать о том, что цифровизация может создавать различные дополнительные проблемы. Цифровая трансформация требует пересмотра устоявшихся процедур и подходов, что связано с неизбежными издержками на адаптацию. Важно также учитывать, что возложение на тех или иных агентов (нижестоящие государственные органы, бизнес, население и т. п.) обязанностей по сбору и обработке информации может приводить к заметному увеличению объема работы с отчетностью. Кроме того, при достижении указанных целей следует по возможности избегать рисков, связанных с информационными технологиями, таких как утечки персональных данных.

2. Мультиагентные системы как инструмент принятия решений в цифровой экономике

Лица, принимающие административно-управленческие решения, сталкиваются с различными сложностями. Укажем на некоторые из них.

Последствия принимаемых решений зависят от реакции множества отдельных децентрализованных агентов, каждый из которых может обладать своими целями и интересами. Результат действий множества таких агентов не всегда легко предсказать. Часто бывает, что некоторые из агентов демонстрируют оппортунистическое поведение, действуя вразрез с принимаемыми решениями.

Динамика экономических процессов может носить стохастический характер, что означает невозможность однозначного предсказания возможных траекторий будущего.

В экономике могут сложиться ранее не встречавшиеся обстоятельства. Это может затруднить прогнозирование развития ситуации с использованием привычных подходов.

По разным причинам последствия новых решений бывает трудно предсказать, и у лиц, принимающих решения, может быть недостаточно знаний для того, чтобы заранее всё просчитать. Поэтому часто приходится принимать решения, а уже потом анализировать последствия.

Действующие в экономике агенты очень разнородны. Принимаемые решения могут приводить к серьезным последствиям для отдельных небольших групп агентов, и вызывать сильную негативную реакцию этих групп.

Экономические процессы, агенты и ресурсы рассредоточены в пространстве. Требуется учитывать географический и пространственный фактор в принимаемых решениях.

Административно-управленческие решения реализуются в рамках административной иерархии, это продукт коллективного труда. В иерархии действуют агенты-управленцы разного уровня. Эти агенты связаны правовыми и служебно-иерархическими ограничениями, но в то же время обладают инициативой и собственными интересами.

Происходящая в экономике цифровая трансформация ведет к пересмотру привычных подходов, моделей поведения, стратегий, целей и т. д. В целом цифровизация и использование машинного интеллекта ведет к изменению образа жизни людей, предлагая новые способы решения стоящих перед людьми проблем. Это касается и выработки управленческих решений в государственных органах.

Одно из перспективных направлений – это использование мультиагентных систем для поддержки принятия административно-управленческих решений. Мультиагентные системы благодаря своим особенностям могут помочь справиться со многими из перечисленных выше проблем.

Основная особенность мультиагентных систем (МАС) – это то, что они содержат множество самостоятельных единиц, называемых агентами. Каждый агент в процессе работы системы предпринимает некоторые действия, взаимодействует с другими агентами и с окружающей средой. Агенты могут действовать по заранее заданным однозначным алгоритмам либо же использовать интеллектуальные способности и способности к обучению для достижения своих целей. В результате совместных действий агентов изменяются они сами, окружающая среда, в которой они действуют и, тем самым, система в целом.

Агенты в МАС – это чаще всего программные сущности. В то же время мультиагентные системы (в отличие от так называемых агент-ориентированных моделей, АОМ) могут включать в качестве агентов аппаратные сущности (роботов), людей, а также организации и коллективы людей, и даже животных.

В качестве отличительных характеристик агентов в мультиагентных системах называют их автономность – определенную степень самостоятельности в выборе действий; социальные способности – способности взаимодействовать между собой; реактивность – способность воспринимать окружающую обстановку и реагировать на изменения в ней; способность к обучению и адаптации (в том числе к обучению от других агентов); проактивность – способности к инициативе и целенаправленному поведению; гетерогенность – разнородность по внутренним характеристикам и поведению; расположение в пространстве; принадлежность сетевым и иерархическим структурам, и т. д.

Благодаря перечисленным свойствам агентов мультиагентные системы отличаются большой гибкостью и способны решать довольно сложные задачи. Именно эта гибкость делает МАС подходящим инструментом в самых различных областях. В частности, МАС могут решать инженерные, экологические, экономические задачи и т. п.

При решении экономических и социальных задач мультиагентная система может быть сконструирована таким образом, чтобы моделируемая реальная область экономики (например, отрасль) и ее агент-ориентированная модель (АОМ) нахо-

дились внутри единой мультиагентной системы. Более того, реальные агенты и их виртуальные аналоги могут находиться внутри единой системы. Такая структура дает возможность двустороннего взаимодействия и симбиоза между агент-ориентированной моделью и экономикой.

Взаимодействие между АОМ и реальной экономикой может быть организовано на основе анализа прямых и обратных информационных потоков, согласно нижеприведенному порядку.

Рассматриваемая область экономики является прообразом для модели. Различная информация о моделируемой области экономики служит для инициализации и калибровки АОМ. Это первичные данные, которые в исходном виде не всегда можно напрямую использовать как основу для принятия решений.

Далее АОМ используется для проведения множественных симуляций при различных начальных условиях. Собранная в результате моделирования информация о возможном поведении виртуальной экономики в разных условиях служит для прогнозирования последствий тех или иных решений и формулировки рекомендаций лицам, принимающим такие решения. Тем самым с помощью АОМ первоначальная информация подвергается аналитической переработке и становится ресурсом для планирования действий управляющих органов.

Когда принятые с учетом рекомендаций решения влияют на соответствующую область экономики, начинают работать механизмы обратной связи. Реальные агенты своими действиями и сообщениями могут формировать массив дополнительной информации, который можно использовать как для изменения состояния виртуальных агентов, так и для калибровки модели в целом. Кроме того, лица, принимающие решения, могут сообщать свои экспертные мнения по поводу качества работы модели, что можно также использовать для калибровки.

Ценность использования АОМ для лиц, принимающих административно-управленческие решения, состоит, в частности, в том, что еще до принятия некоторых новых, нестандартных решений, или до принятия решений в новых, нестандартных обстоятельствах можно провести эксперименты на модели и заранее просчитать возможные последствия. Это позволяет, образно выражаясь, не проводить натурные эксперименты на живых людях, а ограничиться компьютерными симуляциями.

3. Роль механизмов обратной связи в мультиагентной системе принятия решений

Одна из главных составляющих успешного бизнеса в условиях цифровой экономики – это ориентация на потребности и удовлетворенность клиентов. В практике многих успешных современных компаний клиенты не просто потребляют уже произведенный товар или услугу, но еще и участвуют в формировании характеристик производимого товара или услуги.

Государственные органы тоже предоставляют некоторые услуги бизнесу и населению и для них тоже может быть важно ориентироваться на потребности и удовлетворенность получателей услуг. Поэтому принципы персонализированности и адресности могут быть очень важны и для государственных органов. Ис-

пользование современные цифровых технологий может сильно помочь в реализации данных принципов.

Даже если отвлечься от персонализированности и адресности, для государственных органов бывает важна удовлетворенность получателей услуг. Здесь очень важна роль механизмов обратной связи, особенно если учесть то обстоятельство, что государственные услуги зачастую предоставляются через сложную сеть отношений взаимодействия между государственными органами, бизнесом и некоммерческими организациями и населением. Достижение высокого качества принимаемых решений возможно только при использовании своевременной, широкой, качественной и скоординированной информации, получаемой по каналам обратной связи.

Происходящие процессы цифровизации позволяют наладить систематизированный сбор информации в автоматическом и полуавтоматическом режиме. Например, факты обращения граждан в электронной форме за предоставлением государственных услуг порождают соответствующие цифровые следы. Эти цифровые следы могут служить источником ценных данных о потребностях населения в тех или иных услугах и т.п.

Совершенствование методов обработки больших данных дает возможность придать достаточно четкую структуру исходным необработанным данным и сделать их ценным ресурсом для аналитики. Таким образом, выявление, отслеживание, сбор, накопление, систематизация и обработка первичных данных о результатах и показателях тех или иных административно-управленческих решений, и извлеченные из первичных данных полезные знания могут быть ключом к совершенствованию процесса принятия подобных решений и деятельности государственных органов в целом.

При этом серьезный вызов для государственных органов в процессе цифровизации состоит даже не в создании самой по себе современной цифровой инфраструктуры, но в проведении адекватных созданной инфраструктуре институциональных и культурных изменений в системе управления.

Если говорить о структуре мультиагентной системы принятия решений, о которой речь шла выше, то для нее обратная связь может стать одной из ключевых особенностей. Наличие обратной связи от реальных агентов, на которых влияют принимаемые в рамках МАС решения, может существенно повысить качество работы модели, и, как следствие, качество принимаемых решений и, в конечном счете, качество предоставляемых государством услуг.

Обратная связь в МАС принятия решений может осуществляться посредством обобщения информации, содержащейся в цифровых следах, порождаемых внутри имеющейся информационной и цифровой инфраструктуры. Еще одним из источников информации могут служить системы сбора отзывов о качестве государственных услуг и выборочные опросы.

Интересной, хотя и не столь легко реализуемой идеей является возможность использования неструктурированной, но богатой информации, которую можно собирать через социальные сети и интернет в целом. Для обобщения такой информации требуются особые информационные технологии, такие как методы искусственного интеллекта.

Одним из важных принципов получения полной информации по каналам обратной связи является разносторонность данных. А именно, данные, собранные из разных источников и от агентов с различающимися интересами, могут дополнять и корректировать друг друга, что существенно повышает полноту информации.

4. Основные методологические принципы построения мультиагентной системы

Для разработки МАС необходимо решить целый ряд сложных задач, таких как координация между агентами, обучение и безопасность. Учитывая ранее изложенные соображения и имеющийся опыт агентного моделирования при построении различных агент-ориентированных моделей можно предложить следующую обобщенную схему мультиагентной системы принятия решений

В самом общем плане мультиагентная система принятия решений должна представлять собой синтез и переплетение трех составляющих:

- 1) некоторая область реальной экономики (например, региональная система здравоохранения или сельское хозяйство Новосибирской области),
- 2) административно-управляющие органы, осуществляющие принятие ключевых для данной области решений, и
- 3) программно-цифровая инфраструктура.

В основе построения мультиагентной системы лежит агент-ориентированная модель (АОМ), являющаяся цифровым аналогом рассматриваемой области реальной экономики. Можно сказать, что АОМ является ядром МАС.

Мультиагентная система принятия решений в конструируемом варианте будет включать два основных вида агентов:

- 1) действующие в данной области экономики реальные агенты,
- 2) входящие в АОМ виртуальные программные агенты, являющиеся аналогами реальных агентов или реализующие функции по взаимосвязям с другими программными агентами.

Мультиагентная система принятия решений должна состоять из нескольких подсистем, перечисленных ниже.

- 1) Подсистема сбора и подготовки исходной информации.
- 2) Агент-ориентированная модель.
- 3) Подсистема проведения симуляций по модели и обработки результатов.
- 4) Подсистема информирования и поддержки принятия экономических решений для административно-управляющих органов.
- 5) Собственно административно-управляющие органы, отвечающие за данную область реальной экономики.
- 6) Соответствующая область реальной экономики.
- 7) Подсистема обратной связи от действующих в данной области экономики реальных агентов.
- 8) Подсистема обратной связи от административно-управляющих органов.

На программно-аппаратном уровне мультиагентная система принятия решений реализуется на базе платформы мультиагентной информационной системы моделирования экономики.

Платформа, в частности, должна включать в себя:

- средства агент-ориентированного моделирования,
- средства визуализации, анимации и интерактивности, основанные на картографических решениях.

Одна из важных особенностей разрабатываемой платформы и разрабатываемых агент-ориентированных моделей – это акцент на пространственном факторе. Предполагается учитывать пространственное размещение агентов и транспортные издержки при моделировании принятия решений агентами. Это позволит использовать модельные симуляции для оценки последствий принятия решений на региональном и муниципальном уровнях.

5. Концептуальное описание агент-ориентированной модели

Информационная система, как рабочий инструмент управления территориальной экономической экосистемой, предназначена не только для передачи информационных потоков и управляющих воздействий между системой управления и управляемой территорией, но и для полноценной поддержки процессов формирования самих управленческих решений. Для этого в состав информационной системы включаются средства моделирования социально-экономических процессов, такие, как оптимизационные и агент-ориентированные модели.

Модели межотраслевого баланса типа затраты – выпуск (ОМММ), определяют оптимальные объёмы выпуска продукции для нескольких десятков отраслей в десятках регионов методами линейного программирования. Основные проблемы такого подхода связаны с тем, что реальные системы богаче по многообразию элементов и по сложности связей, не укладывающихся в линейные представления. Сведение реальности к линейному описанию является достаточно грубым упрощением. Кроме того, модель необходимо описать всю целиком и сразу. Это подход сверху вниз. Автор, как демиург, создаёт мир из единого принципа – оптимального плана.

В противоположность этому агентные модели (АОМММ) строятся снизу вверх, из отдельных элементов, которые называются агентами, поскольку являются представителями экономических субъектов, таких как физические и юридические лица, государственные органы и структуры, общественные объединения. Агент характеризуется своим состоянием и активным, целенаправленным поведением, выводящим систему из равновесия и приводящим к возрастанию сложности и многообразия.

Кроме агентов, модель наполняется объектами, которые также обладают состоянием, но их поведение не является целенаправленным, а подчиняется законам природы. Объекты в модели представляют ресурсы, такие как земля, вода, полезные ископаемые, здания и сооружения, автомобильные и железные дороги, линии электропередач и трубопроводы. Предоставленные сами себе, объекты не проявляют собственной активности, а естественным образом разрушаются либо стремятся к состоянию равновесия, следуя принципу минимального действия.

Состояние агента можно представить как структуру данных, скомпонованную из совокупности переменных и массивов разной размерности и типа. Обобщая далее, приходим к представлению агента, как системы, то есть модели, включающей совокупность агентов и объектов. И такая матричная структура может

иметь какую угодно глубину. В этой картине явным образом просматривается метафора объектно-ориентированного подхода в программировании, который за несколько десятилетий своего постоянного применения доказал свою способность адекватно описывать статику и динамику реальных систем.

Модель является цифровой копией экономической экосистемы. Агенты и объекты являются цифровыми копиями реальных социально-экономических субъектов и ресурсов. Для полноты и эффективности описания экономики к основным элементам модели надо добавить процессы. Процессы – это преобразователи ресурсов, а ресурсы – это условия протекания процессов. Время, как и пространство, также принадлежит к основным ресурсам, поскольку без них не может протекать ни один процесс.

Чтобы имитировать функционирование экономической экосистемы в столь различающихся условиях, необходимо уметь воспроизводить в модели все существенно важные субъекты и ресурсы. И эти элементы не обязаны иметь непременно материальные прототипы. Это могут быть и такие виртуальные объекты, как знания, технологии, чертежи, учебные курсы, произведения искусства. В человеческом сознании они превращаются в опыт, компетенции, умения, навыки, которые могут быть проявлены в определённых условиях и процессах.

Когда информационные системы станут рабочим инструментом систем управления и получат повсеместное распространение, адекватность модели будет автоматически достигаться тем, что цифровые копии всех ресурсов и субъектов будут с точки зрения их взаимодействий между собой неотличимы от их взаимодействий в реальности просто по построению. Но на этапе разработки и внедрения информационных систем достижение адекватности, то есть необходимого уровня соответствия между реальностью и моделью, является нетривиальной задачей, которая решается путём калибровки модели.

Если калибровка проводится по данным государственной или отраслевой статистики, то агенты и объекты в модели должны быть предварительно подготовлены к этой процедуре. Подготовка состоит в том, что агенты и объекты должны включать в своё состояние параметры, составляющие информационную основу, а их поведение – имитировать методику сбора данной статистики. В таком случае калибровка модели по любому набору статистик становится тривиальной процедурой, для включения которой достаточно расставить “галочки” напротив тех статистических показателей, по которым модель должна максимально совпадать с реальностью. При этом калибровать модель можно как на входе, так и на выходе. Калибровка на входе касается показателей запаса – по состоянию на определённую дату, а калибровка на выходе – показателей потока за определённый период. В последнем случае необходимо запускать процедуру типа поиска решения с варьированием свободных параметров и добиваться совпадения всех отмеченных показателей с данными статистики. Если такая калибровка проводится неоднократно, то имеет смысл “обучать” модель калибровке с помощью процедур машинного обучения – искусственного интеллекта.

Как упоминалось выше, некоторые агенты и объекты могут быть настолько сложными, что для реализации их состояния и поведения может потребоваться создание отдельной модели, которая также может включать сложные объекты. Чтобы при проведении вычислительных экспериментов с моделями не тунуть

в таких “чёрных дырах”, пожирающих вычислительные ресурсы в бесконечной рекурсии, необходимо заранее аппроксимировать поведение таких агентов и объектов путём машинного обучения, заменяя полномасштабный запуск множества моделей вычислением простых функций по нейронным сетям.

Агентная модель для реализации имитационного процесса имеет вычислительное ядро, поддерживающее “жизнь” модели со всеми взаимодействиями между агентами и объектами, общее количество которых может достигать миллионов штук. На самом деле все агенты и объекты взаимодействуют только с этим ядром, и уже через него, как через общую шину, вписываются в “пространство”, “время” и связываются с “соседями”, “партнёрами” и “окружающей средой”. Таким образом, всё бесконечное многообразие содержательных связей элементов между собой внутри модели сводится к двум элементарным операциям взаимодействия каждого элемента с общей шиной – передачи и приёма сообщений. Сообщение должно иметь адресат в виде конкретного элемента или вычисляемого условия по типу или состоянию элементов, а также тело сообщения в виде объекта – “переговорщика”. Служба сообщений реализует их быструю доставку, пользуясь индексацией и запоминая в кэше постоянные связи.

Движение имитационного процесса по времени происходит квантами – на 1 шаг. Но это не значит, что все элементы модели на каждом шагу что-нибудь обязаны делать. У каждого элемента свой темп жизни, который определяется его состоянием и правилами поведения. Объект может пропустить какое-то количество квантов времени, затем “проснуться”, подкорректировать своё состояние и снова “заснуть” на определённый промежуток времени. Перед тем, как “заснуть”, он посылает сообщение системному элементу “время” “разбудить” его через заданное число шагов или при наступлении некоторого вычислимого события. Также “разбудить” его может любой другой элемент, просто передав ему сообщение.

Особое место среди базовых элементов модели занимают процессы, которые определяются как преобразователи ресурсов. В принципе процесс можно мыслить как динамический объект. Процесс во время инициализации связывается с объектами – входными и выходными ресурсами, преобразующимися друг в друга при протекании процесса. После запуска процесса в некоторый момент времени, он “работает”, не затрачивая времени вычислительного ядра, до опустошения входных запасов или первого изменения связанных с ним ресурсов. И только в этот момент происходит пересчёт запасов каждого из этих ресурсов. Процесс может быть прикреплён к некоторому агенту, который, в целях управления, может не допускать опустошения запасов, а заранее их пополнять. Для этого агент настраивает состояние процесса так, чтобы при достижении определённого минимального уровня для каждого запаса процесс посылал сообщение своему агенту. В этом случае процесс во время запуска вычисляет момент времени, в который надо генерировать ближайшее такое событие – одно или несколько, и засыпает до наступления этого момента. После пробуждения он отсылает все заготовленные сообщения и вычисляет момент для следующей остановки.

Что касается географического размещения элементов на карте, то за это отвечает системный элемент “пространство”, который контролирует взаимное расположение элементов модели на плоскости, предотвращая наложение одного объекта на другой, передавая обоим одно и то же сообщение, тем самым давая им

возможность разобраться с этой ситуацией. Передача сообщения о столкновении происходит не после столкновения, а непосредственно перед ним, то есть в тот момент, когда столкновение ещё не произошло, но обязательно произойдёт до истечения следующего кванта времени. “Пространство” умеет также вычислять расстояния по прямой и по каналам движения (магистралям), перемещает элементы по территории, просто обрабатывая адресованные ему сообщения типа “переместить элемент А из точки В в точку С по магистралям, удовлетворяющим правилу отбора со скоростью V или к моменту времени T”. При этом, смещая элемент по территории, “пространство” извещает сам элемент, что его состояние изменилось и его текущее положение, а также скорость равны новым значениям.

В ядре есть и такой элемент, как “визуализация”, который срабатывает либо в режиме “видеопотока”, либо в некоторых заранее оговоренных точках по времени или по состоянию. Пока “визуализация” не разошлёт сообщения всем элементам, попадающим в отображаемое окно, ни один элемент не потратит ни единой команды на отрисовку себя на экране. “Визуализация” контролирует и порядок отображения элементов. Те из них, которые лежат снизу, начинают отрисовываться в первую очередь, а те, что лежат сверху – в последнюю. Всякие надписи и деловая графика рисуются специальными функциями “визуализации” после отрисовки всех основных элементов модели.

Пользователь системы может задать простой режим отображения, происходящего во время счёта, либо задать способы представления для особых случаев, заданных условиями по состоянию модели. Управление презентацией вычислительного процесса требует также разработки специальных агентов и объектов – “дикторов” и “экспертов”, которые выводят картинку и либо просто сообщают о наступившем событии, либо запускают некоторый анализ произошедшего. С их помощью можно любой запуск модели превратить в “художественный фильм”, задав сценарий из ловушек, заряженных на определённые события, наступление которых порождает визуализацию эпизодов крупным планом.

6. Пространственная составляющая АОМ (на примере Новосибирской области)

Географически мир в модели представлен *картой*. Карта состоит из двумерного *пространства* (например, в виде системы полигонов, отражающих реальную географию соответствующего региона), статичных *объектов* (в виде точек или полигонов) и *путей перемещения агентов* (в виде системы полилиний). Также вводится административно-территориальное деление, соответствующее фактическому делению региона в реальном мире. Например, для субъекта Российской Федерации (Новосибирской области) можно учесть деление на муниципальные образования. Географически деление может быть задано как система полигонов (см. рис. 1). Агенты в модели должны принадлежать тем или иным территориям в этом делении.

К географической составляющей модели можно добавить данные о реальных транспортных системах (таких как железные и автомобильные дороги) и данные о населённых пунктах как местах концентрации фирм, домохозяйств и государственных учреждений.

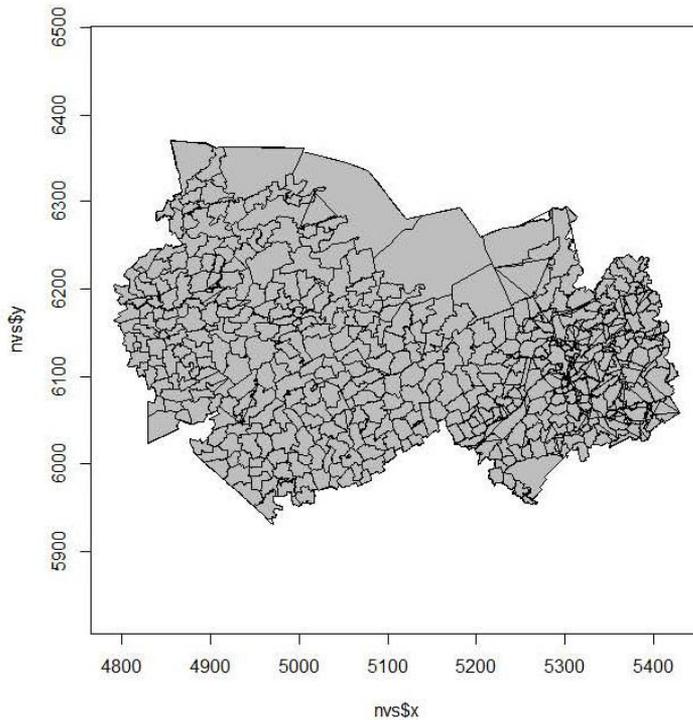


Рис. 1. Деление Новосибирской области
Fig. 1. Division of the Novosibirsk Region

На этапе инициализации, когда модель заполняется и создаются агенты, следует учесть пространственную информацию о реальной экономике. Для этого следует использовать интеграцию модели с геоинформационными системами, а также использовать различного рода региональную статистику, собираемую государственными органами.

При использовании данных по муниципальным образованиям РФ из различных областей российской статистики на дезагрегированном уровне удобно задействовать коды ОКТМО. Также имеется возможность использования географической информации в виде почтового адреса фирмы или государственного учреждения. Такие сервисы как Яндекс.Карты позволяют приписать почтовому адресу географические координаты.

Для размещения на карте домохозяйств можно использовать следующий алгоритм. Пусть, например, для некоторой территории, заданной системой полигонов, известна только общая численность населения, и более точной информации нет. Тогда можно принять в качестве приближения гипотезу о том, что плотность населения на данной территории постоянна, и использовать для расселения агентов-домохозяйств равномерное по территории распределение.

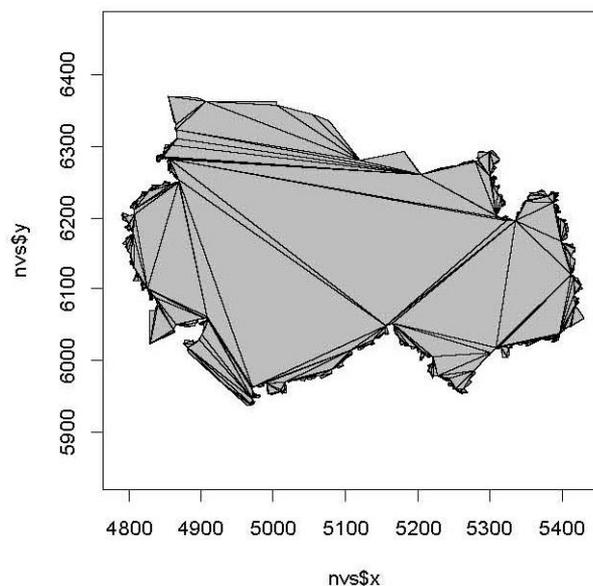


Рис. 2. Триангуляция территории Новосибирской области
Fig. 2. Triangulation in the Novosibirsk Region

Для генерации точек из равномерного распределения полигоны подвергаются разбиению на систему треугольников (это называется триангуляцией). (См. на рис. 2 пример триангуляции территории Новосибирской области.) Сначала выбирается случайный полигон с вероятностью, пропорциональной приходящемуся на него населению. Затем выбирается случайный треугольник внутри данного полигона с вероятностью, пропорциональной площади. Затем выбирается случайная точка по равномерному распределению внутри данного треугольника.

На рис. 3 показан результат генерации 10000 случайных точек для муниципальных образований Новосибирской области. По каждому муниципальному образованию была известна система полигонов и население.

Данный алгоритм размещения агентов может быть уточнен за счет привлечения дополнительной информации. Например, если внутри данной территории находятся определенные населенные пункты, то можно предварительно вычесть из общего населения территории население этих населенных пунктов. Затем отдельно моделируется расселение по населенным пунктам, а отдельно по остальной территории. При таком подходе более точно учитывается плотность населения с учетом имеющейся информации.

Когда агенты выбирают из нескольких возможных поставщиков товаров и услуг, они в показателе привлекательности могут определенным образом учитывать транспортные издержки – чем больше издержки, тем меньше привлекательность поставщика.

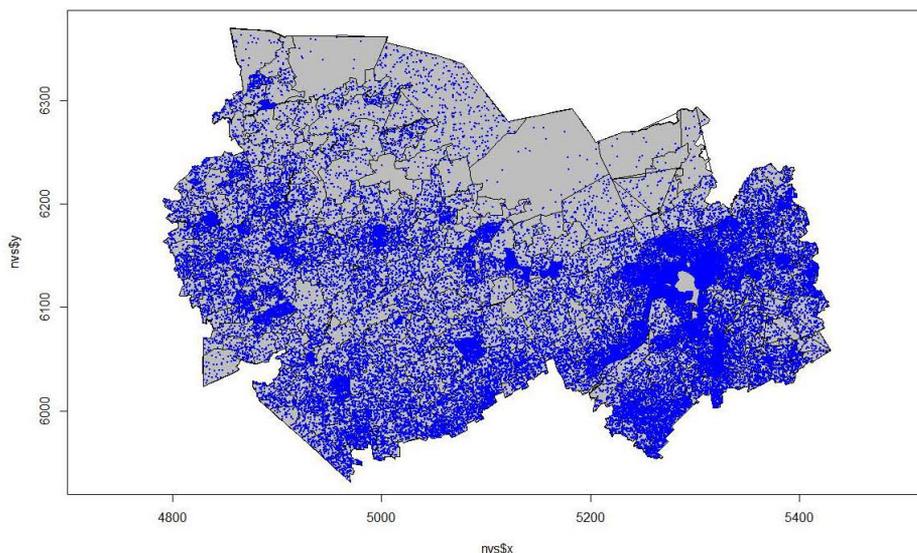


Рис. 3. Пример случайного размещения агентов на территории Новосибирской области
 Fig. 3. Example of random location of agents in the Novosibirsk Region

В следующей таблице приведен пример использования формул модели привлекательности. Таблица демонстрирует, как может распределяться спрос агента между несколькими поставщиками в зависимости от цены и расстояния.

Поставщик, j	Цена, P_j	Расстояние, L_{ij}	Привлекательность, $A_{ij} = \exp(20 - 3 \cdot \ln(P_j + 2 \cdot L_{ij}))$	Доля (вероятность), $\gamma_{ij}, \%$
1	100	50	7762.6	25
2	200	30	5768.9	19
3	150	20	11001.5	36
4	250	10	6188.3	20

При расчете расстояния и транспортных издержек агент-клиент (или, в других ситуациях, агент-поставщик) предварительно выбирает из возможных транспортных путей, то есть принимает транспортно-логистическое решение. В результате данного выбора в модели формируются пространственные потоки поставляемых товаров и услуг.

Также в модели предусматривается возможность перемещения агентов в пространстве (миграция и т. п.). При этом принимается само решение о перемещении – перемещаться или нет, решение о месте назначения и транспортно-логи-

стическое решение. В результате данного выбора в модели формируются пространственные пассажиропотоки.

Транспортно-логистические решения должны учитывать имеющуюся транспортную инфраструктуру. Транспортировка должна быть связана с затратами транспортного ресурса и с затратами времени.

Для ускорения работы АОМ транспортно-логистические расчеты можно провести на предварительном этапе. При этом можно использовать методы машинного интеллекта. Например, можно заранее сформировать таблицу расстояний по автомобильным дорогам между основными пунктами моделируемой территории. Агенты могут обращаться к готовым таблицам в процессе работы модели.

Выходная статистика по симуляциям модели должна отражать распределение экономических процессов в пространстве. Например, для модели субъекта РФ можно собирать и обобщать статистику по отдельным районам. Для дальнейшего использования можно выдавать статистику пользователям в виде таблиц или карт.

Заключение

Мы уверены, что мультиагентные системы предоставляют огромные возможности в процессе поддержки принятия управленческих решений на региональном уровне.

Применение мультиагентных систем позволит повысить эффективность управленческих решений, связанных с реализацией документов стратегического планирования, определяющих развитие Новосибирской области на долгосрочную перспективу, в частности, в связи с реализацией программы реиндустриализации экономики области. Цифровая платформа, построенная на принципах, агент-ориентированного моделирования с территориальной привязкой к конкретному региону станет основным элементом инновационного аппарата для обоснования выбора из множества возможных решений. Предлагаемые модельный инструментарий и информационная система позволят упростить процесс принятия стратегических решений на различных уровнях управления (субъектов Федерации, муниципалитетов, поселений). Также результаты работы модели могут быть использованы при сравнительном анализе и выборе вариантов региональной и промышленной политики.

Список литературы

1. **Luck M. et al.** Agent Technology: Computing as Interaction (A Roadmap for Agent Based Computing). *AgentLink*, 2005. URL: <http://www.agentlink.org/roadmap/> (дата обращения 01.10.2020).
2. **Городецкий В. И., Скобелев П. О.** Многоагентные технологии для промышленных применений: Реальность и перспектива // Труды СПИИРАН. 2017. № 6. С. 11–45.
3. **Wooldridge M.** Intelligent Agents. In: Weiss G. (ed.) *Multi-Agent Systems* (second edition). MIT Press, 2013, p. 3–50.
4. **Тарасов В. Б.** От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика. М.: Эдиториал УРСС. 2002.

5. **Lu J., Yu X., Chen G., Yu W.** (eds.) *Complex Systems and Networks: Dynamics, Controls and Applications*. Springer, 2016.
6. **Caragea D., Silvescu A., Honavar V.** Towards a Theoretical Framework for Analysis and Synthesis of Agents that Learn from Distributed Dynamic Data Sources. In: *Emerging Neural Architectures Based on Neuroscience*. Springer-Verlag New York Inc, 2001, p. 547–559.
7. **Steen M., Popescu B., Tanenbaum A.** A Security Architecture for Object-Based Distributed Systems. *ACSAC*, 2002, p. 161–171.
8. **White R., Engelen G., Uljee I.** The use of constrained cellular automata for high-resolution modeling of urban land use dynamics. *Environment and Planning*, 1997, vol. 24, p. 323–343.
9. **Honavar V., Slutzki, G.** (eds) *Grammatical Inference*. Berlin, Springer-Verlag, 1998.
10. **Tirea M., Tandau I., Negru V.** Stock Market Multi-Agent Recommendation System Based on the Elliott Wave Principle. In: Quirchmayr G., Basl J., You I., Xu L., Weippl E. (eds) *Multidisciplinary Research and Practice for Information Systems. CD-ARES 2012. Lecture Notes in Computer Science*, vol. 7465. Springer, Berlin, Heidelberg, 2012.
11. **Liu X., and Cao, H.** Price limit and the stability of stock market: an application based on multiagent system. In: *Proceedings of the 2nd International conference on artificial intelligence, management science and electronic commerce*, Deng Leng, 2011, p. 484-487.
12. **Yoshikazu I., Shozo, T.** Multi-Fractality Analysis of Time Series in Artificial Stock Market Generated by Multi-Agent Systems Based on the Genetic Programming and Its Applications. *IEICE Trans. Fundam. Electron. Commun. Comput. Sci.* E90-A, 10 (October 2007), 2007, p. 2212–2222.
13. **Marwala T., Patel P.B.** Neural Networks, Fuzzy Inference Systems and Adaptive-Neuro Fuzzy Inference Systems for Financial Decision Making. In: *Neural Information Processing, ICONIP 2006*, 2006, p. 430–439.
14. **Montoya A. de J., Ovalle D. A.** Energy Consumption by Deploying a Reactive Multi-Agent System In-side Wireless Sensor Networks. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 152, 2013, p. 925-934.
15. **Liu C., Tesfatsion L., Yu N.** Financial Bilateral Contract Negotiation in Wholesale Electricity Markets Using Nash Bargaining Theory. *IEEE Transactions on Power Systems*, 27 (1), 2012, p. 251–267.
16. **Khalilian M.** Towards Smart Advisor's Framework Based on Multi Agent Systems and Data Mining Methods. *Lecture Notes in Electrical Engineering* 156, 2013, p. 73–78.
17. **Wang S. A.** CyberGIS Framework for the Synthesis of Cyberinfrastructure, GIS, and Spatial Analysis. *Annals of the Association of American Geographers*, 100, 2010, p. 535–557.

References

1. **Luck M. et al.** *Agent Technology: Computing as Interaction (A Roadmap for Agent Based Computing)*. *AgentLink*, 2005. URL: <http://www.agentlink.org/roadmap/>

2. **Gorodetsky V. I., Skobelev P. O.** Industrial applications of multi-agent technology: reality and perspectives. *SPIIRAS Proceedings*, 2017, № 6, p. 11–45.
3. **Wooldridge M.** Intelligent Agents. In: Weiss G. (ed.) *Multi-Agent Systems* (second edition). MIT Press, 2013, p. 3–50.
4. **Tarasov V. B.** From multi-agent systems to intellectual organizations: philosophy, psychology, informatics. Moscow, URSS, 2002
5. **Lu J., Yu X., Chen G., Yu W.** (eds.) *Complex Systems and Networks: Dynamics, Controls and Applications*. Springer, 2016.
6. **Caragea D., Silvescu A., Honavar V.** Towards a Theoretical Framework for Analysis and Synthesis of Agents that Learn from Distributed Dynamic Data Sources. In: *Emerging Neural Architectures Based on Neuroscience*. Springer-Verlag New York Inc, 2001, p. 547–559.
7. **Steen M., Popescu B., Tanenbaum A.** A Security Architecture for Object-Based Distributed Systems. *ACSAC*, 2002, p. 161–171.
8. **White R., Engelen G., Uljee I.** The use of constrained cellular automata for high-resolution modeling of urban land use dynamics. *Environment and Planning*, 1997, vol. 24, p. 323–343.
9. **Honavar V., Slutzki G.** (eds) *Grammatical Inference*. Berlin, Springer-Verlag, 1998.
10. **Tirea M., Tandau I., Negru V.** Stock Market Multi-Agent Recommendation System Based on the Elliott Wave Principle. In: Quirchmayr G., Basl J., You I., Xu L., Weippl E. (eds) *Multidisciplinary Research and Practice for Information Systems. CD-ARES 2012. Lecture Notes in Computer Science*, vol. 7465. Springer, Berlin, Heidelberg, 2012.
11. **Liu X., and Cao, H.** Price limit and the stability of stock market: an application based on multiagent system. In: *Proceedings of the 2nd International conference on artificial intelligence, management science and electronic commerce*, Deng Leng, 2011, p. 484–487.
12. **Yoshikazu I., Shozo T.** Multi-Fractality Analysis of Time Series in Artificial Stock Market Generated by Multi-Agent Systems Based on the Genetic Programming and Its Applications. *IEICE Trans. Fundam. Electron. Commun. Comput. Sci.* E90-A, 10 (October 2007), 2007, p. 2212–2222.
13. **Marwala T., Patel P. B.** Neural Networks, Fuzzy Inference Systems and Adaptive-Neuro Fuzzy Inference Systems for Financial Decision Making. In: *Neural Information Processing, ICONIP 2006*, 2006, p. 430–439
14. **Montoya A. de J., Ovalle D. A.** Energy Consumption by Deploying a Reactive Multi-Agent System In-side Wireless Sensor Networks. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2013, 152, p. 925–934.
15. **Liu C., Tesfatsion L., Yu N.** Financial Bilateral Contract Negotiation in Wholesale Electricity Markets Using Nash Bargaining Theory. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2012, 27 (1), p. 251–267.
16. **Khalilian M.** Towards Smart Advisor’s Framework Based on Multi Agent Systems and Data Mining Methods. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2013, 156, p. 73–78.

17. **Wang S. A.** CyberGIS Framework for the Synthesis of Cyberinfrastructure, GIS, and Spatial Analysis. *Annals of the Association of American Geographers*, 2010, 100, p. 535–557.

Материал поступил в редколлегию 25.03.2020

Принят к печати 25.06.2020

The article was submitted 25.03.2020

Accepted for publication 25.06.2020

Сведения об авторах

Суслов Виктор Иванович, член-корреспондент РАН, заведующий лабораторией, Институт экономики и организации промышленного производства СО РАН (Новосибирск, Россия)

suslov@ieie.nsc.ru

ORCID 0000-0001-7972-9811

SCOPUS 36118380200

Web of Science U-9415-2019

Костин Виталий Сергеевич, старший научный сотрудник, Институт экономики и организации промышленного производства СО РАН (Новосибирск, Россия)

vit.kostin@gmail.com

SPIN-код 75163

Иванов Евгений Юрьевич, Новосибирский государственный университет (Новосибирск, Россия)

ieiu@nsu.ru

SPIN-код 114629

Web of Science H-3169-2013

Ибрагимов Наимджон Мулабоевич, кандидат экономических наук, доцент, старший научный сотрудник, Институт экономики и организации промышленного производства СО РАН (Новосибирск, Россия); зам. декана экономического факультета, Новосибирский государственный университет (Новосибирск, Россия)

naimdjon.ibragimov@gmail.com

SPIN-код 6608-4495

ORCID 0000-0001-8540-5039

Scopus author ID 57202757558

Новикова Татьяна Сергеевна, доктор экономических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, Институт экономики и организации промышленного производства СО РАН (Новосибирск, Россия)

tsnovikova@mail.ru
ORCID 0000-0001-8636-5219
Scopus ID 44661276300

Цыплаков Александрович Анатольевич, кандидат экономических наук, старший научный сотрудник, Институт экономики и организации промышленного производства СО РАН (Новосибирск, Россия); доцент экономического факультета, Новосибирский государственный университет (Новосибирск, Россия)

alexander.tsyplakov@gmail.com
ORCID 0000-0002-9297-3269
Scopus 57192156252

Information about the Authors

Victor I. Suslov, Corresponding member RAS, head of laboratory, Institute of Economics and Industrial Engineering SB RAS (Novosibirsk, Russian Federation)

suslov@ieie.nsc.ru
ORCID 0000-0001-7972-9811
SCOPUS 36118380200
Web of Science U-9415-2019

Vitalii S. Kostin, senior Researcher, Institute of Economics and Industrial Engineering SB RAS (Novosibirsk, Russian Federation)

vit.kostin@gmail.com
РИИЦ 75163

Evgeny Yu. Ivanov, Candidate of Sciences (Economics), senior ingeneer, Institute of Economics and Industrial Engineering SB RAS (Novosibirsk, Russian Federation); associate professor, Novosibirsk State University (Novosibirsk, Russian Federation)

ieu@nsu.ru
SPIN-код 114629
Web of Science H-3169-2013

Naimdjon M. Ibragimov, Candidate of Sciences (Economics), senior Researcher, Institute of Economics and Industrial Engineering SB RAS (Novosibirsk, Russian Federation); Vice Dean, Novosibirsk State University (Novosibirsk, Russian Federation)

naimdjon.ibragimov@gmail.com

SPIN-код 6608-4495

ORCID 0000-0001-8540-5039

Scopus author ID 57202757558

Tatyana S. Novikova, Doctor of Sciences (Economics), Professor, Leading Researcher, Institute of Economics and Industrial Engineering SB RAS (Novosibirsk, Russian Federation)

tsnovikova@mail.ru

ORCID 0000-0001-8636-5219

Scopus ID 44661276300

Alexandr A. Tsyplakov, Candidate of Sciences (Economics), senior Researcher, Institute of Economics and Industrial Engineering SB RAS (Novosibirsk, Russian Federation); associated professor, Novosibirsk State University (Novosibirsk, Russian Federation)

alexander.tsyplakov@gmail.com

ORCID 0000-0002-9297-3269

Scopus 57192156252