

СОЦИАЛЬНО-ПРИРОДНЫЕ И СОЦИО-ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ, СОЗДАННЫЕ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА АГЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ¹

А. Ф. Агеева

Центральный экономико-математический институт РАН, Москва, Россия

В статье дан обзор актуальных, разработанных за рубежом в течение последнего десятилетия социально-природных и социо-эколого-экономических моделей, созданных с помощью метода агентного имитационного моделирования, успешно применяемого для решения широкого круга задач, связанных с исследованием характера взаимовлияния компонентов социально-природных систем и оценкой последствий социально-природного взаимодействия, а также поиском оптимальных стратегий устойчивого экономического развития регионов с соблюдением принципов экологической безопасности. Проведен анализ конструктивных особенностей агент-ориентированных и мультиагентных моделей и на основе его результатов предложена классификация моделей, в соответствии с которой их можно объединить по двум группам, в каждой из которых существует несколько подтипов в зависимости от назначения и специфики концептуальной идеи построения имитационного процесса. Первая группа включает модели, в которых воспроизводится структура взаимосвязанных компонентов системы «природа – общество» и имитируются антропогенные процессы в границах исследуемых территорий (регионов), вторая – модели, с помощью которых создаются системы для интерактивного мониторинга и контроля качества окружающей среды, имитируются процессы загрязнения окружающей среды вредными веществами и оценивается влияние экологических условий на состояние здоровья населения, проживающего в границах исследуемых территорий (регионов). Приведены примеры моделей, построенных с привлечением геоинформационных и информационно-телекоммуникационных технологий. Дальнейшее усовершенствование современных методов научного анализа и прогнозирования, моделирование крупномасштабных высокодетализированных систем и процессов, связанных с изучением социально-экологических проблем взаимодействия общества и природы, а также создание интеллектуальных систем управления качеством окружающей среды напрямую связаны с задачей увеличения производительности моделей, решению которой способствует переход от последовательного имитационного моделирования к параллельному и распределенному, а также использование специализированных программно-аппаратных средств и суперкомпьютерных ресурсов для обеспечения параллельных вычислений.

Ключевые слова: агент-ориентированные модели, мультиагентные модели, антропогенное воздействие, загрязнение окружающей среды, устойчивое региональное развитие.

SOCIO-NATURAL AND SOCIO-ECOLOGO-ECONOMIC MODELS DESIGNED BY THE METHOD OF AGENT MODELING

Alina F. Ageeva

Central Economics and Mathematics Institute of Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia

The article reviews topical socio-natural and socio-ecologo-economic models designed in overseas countries during the last decade with the help of the method of agent imitation modeling, which is successfully used to resolve a wide

¹ Статья подготовлена по результатам исследования, выполненного при поддержке Российского гуманитарного научного фонда, проект № 17-02-00416.

range of tasks connected with researching the character of mutual impact of components of socio-natural systems and assessment of consequences of socio-natural interaction, as well as searching for optimal strategies of sustainable economic development in regions observing the principles of ecologic security. It analyzes constructive features of agent-oriented and multi-agent models and on the basis of its results it puts forward the classification of models, according to which it is possible to combine them in two groups, each of them includes several sub-types depending on the purpose and specific conceptual idea of building the imitation process. The 1st group embraces models, which reproduces the structure of interconnected components of the system 'nature-society' and imitates anthropogenic processes within the frames of territories (regions) being researched, the 2nd one – models, with the help of which it is possible to design systems for interactive monitoring and control over the environment quality, to imitate processes of environment contamination with harmful matters and to assess the impact of ecological conditions on health of the population living on territories (regions) being researched. Examples of models designed by geo-informational and information-telecommunication technologies are provided. Further development of advanced methods of scientific analysis and forecasting, modeling of large-scale highly-detailed systems and processes connected with studying socio-ecological problems of interaction of society and nature and design of intellectual systems of managing the quality of the environment is directly connected with the aim of increasing model productivity, whose resolving can be promoted by passing-over from imitation modeling to parallel and distributed one, as well as using specialized program-apparatus means and super-computer resources to provide parallel calculations.

Keywords: agent-oriented models, multi-agent models, anthropogenic impact, contamination of the environment, sustainable regional development.

Возможности имитационного моделирования представляют значительный интерес для специалистов, занятых в таких междисциплинарных областях, как экологическая экономика и экологическая информатика. В течение последних двух десятилетий активно применяется агентное моделирование для имитирования взаимосвязей общества и природы, а также оценки негативного антропогенного воздействия на окружающую среду. Метод агентного моделирования позволяет воспроизводить структуру и взаимосвязи сложноустроенных организмов. Так, можно изучать характер взаимоотношений и взаимозависимостей компонентов социально-природных и социо-эколого-экономических систем, прогнозировать последствия влияния на них различных факторов, что обеспечивает его успешное применение для решения широкого круга задач, связанных с поиском оптимальных стратегий устойчивого экономического развития регионов с соблюдением принципов экологической безопасности, а также адекватной оценки проектов, реализация которых сопряжена с антропогенным влиянием на окружающую среду. Обеспечение экологической безопасности в современных социально-экономических условиях развития общества обуславливает

задачи организации эффективной природоохранной деятельности, в первую очередь функционирования информационных систем экологического мониторинга. Условия выполнения непрерывного слежения в рамках единой системы экологического мониторинга требуют создания автоматизированных систем управления, осуществляющих сбор и качественную обработку огромного количества разнородных потоков информации, и на основе комплексного анализа множества данных, позволяющих контролировать в интерактивном режиме времени параметры качества окружающей среды, принимать меры реагирования в случае возникновения чрезвычайной экологической ситуации. Создание и функционирование интеллектуальных систем управления подобного типа становятся возможными благодаря использованию мультиагентных технологий – стремительно развивающихся и перспективных направлений в области искусственного интеллекта.

К настоящему времени разработано огромное количество разнообразных агент-ориентированных (АОМ) и мультиагентных (МАС) моделей для изучения социально-природных взаимодействий и социально-экологических проблем. Модели можно условно разделить на типовые

группы по схожести концептуальных идей построения имитационного процесса или цели конкретного исследования:

- для имитирования загрязнения окружающей среды вредными веществами и оценки экологической ситуации исследуемых территорий (регионов);

- для изучения характера взаимовлияния и взаимозависимости компонентов социально-природных систем;

- для оценки последствий социально-природного взаимодействия.

К последней, самой многочисленной группе относятся модели, в которых прогнозируются изменения социально-экономических условий под влиянием природных, климатических, экологических процессов или, наоборот, экологические последствия антропогенного воздействия. Отдельную группу представляют МАС и АОМ, в которых воспроизводится комплексная взаимосвязанная структура социо-эколого-экономических систем, сочетающая природные, производственные, демографические и другие элементы, функционирующие в границах исследуемых территорий или регионов. Они предназначены для тестирования всевозможных сценариев с целью прогнозирования влияния производственной деятельности на экологию, природоохранных мероприятий на экономику, социальных преобразований и демографических движений на экономику и окружающую среду региона.

В статье [1] представлены концепция и конструкция мультиагентной социо-эколого-экономической модели региона, разработанной в Центральном экономико-математическом институте РАН, с помощью которой можно имитировать не только влияние деятельности людей на экономику и экологию региона, но и обратное влияние на здоровье и трудовое поведение населения вследствие изменившихся экологических и экономических условий. МАС состоит из нескольких частных моделей, построенных в рамках одной комплексной модели, в которой воспроизво-

дится природная среда региона, социально-демографическая структура его населения, а также структура его экономики. Активными агентами МАС являются жители и предприятия региона. Более крупные акторы, такие как муниципальные образования и регион в целом как административная единица и часть экосистемы, служат для них внешней средой. Модель, прототип которой реализован на примере Вологодской области в виде пользовательского программного продукта, можно использовать для задач регионального планирования, связанных с поиском стратегий устойчивого развития регионов: предотвращения хищнической эксплуатации природных ресурсов и обеспечения сбалансированного экономического роста.

На основе модели региона разработана АОМ управления экологическим поведением промышленных предприятий. Для этого мы имитировали сценарий внедрения современного способа регулирования промышленных выбросов в соответствии с принципами торговли квотами на выбросы вредных веществ [2]. В рамках дальнейшей работы по имитированию загрязнения окружающей среды, оценке влияния экологической нагрузки на здоровье населения региона и апробации различных природоохранных стратегий для нас представляет интерес опыт зарубежных коллег по созданию АОМ и МАС, с помощью которых имитируются процессы антропогенного воздействия и прогнозируются их последствия, оценивается уровень загрязнения окружающей среды вредными веществами, осуществляются мониторинг и контроль качества окружающей среды, исследуется влияние экологических условий регионов на состояние здоровья населения.

С учетом характера пространственно-географического распределения населения в границах административных образований и видов хозяйственной деятельности человека в агентных моделях имитируются различные виды антропогенного воздействия в границах сельскохозяйственных, рекреационных и городских тер-

риторий с целью прогнозирования социальных, экологических и экономических последствий.

Взаимодействие общества и природы: имитирование антропогенных процессов

Актуальными проблемами устойчивого развития сельских регионов, которые изучаются с помощью имитационного моделирования, являются вопросы, связанные с поиском стратегий рационального использования природных ресурсов, особенно в регионах с их дефицитом, а также оценкой планируемых реформ в области сельского хозяйства и проектов инженерного обустройства сельскохозяйственных территорий, направленных на повышение качества жизни сельского населения и финансовой поддержки фермерской деятельности. В коллективной монографии [7] представлены результаты проекта, проводимого в начале 2000-х гг. по инициативе научно-исследовательского учреждения Rice Research Institute при участии Консультативной группы по международным исследованиям в области сельского хозяйства и Центра международного сотрудничества в области сельскохозяйственных исследований. В рамках проекта совместными усилиями специалистов и заинтересованных лиц – представителей органов власти и управляющих компаний, а также фермеров, проживающих в границах исследуемого региона, создан целый ряд АОМ и МАС с целью имитации и анализа социально-экологических процессов, протекающих в странах Юго-Восточной Азии. Модели предназначены для поиска рациональных компромиссов между интересами социальных групп, занятых различными видами деятельности, с целью предотвращения деградации сельскохозяйственных земель, истощения природных ресурсов, разработки режимов их справедливого коллективного использования, а также оценки проектов инженерного обеспечения сельских территорий, расположенных в регионах со сложными климатическими условиями.

МАС [3; 14] созданы для регулирования хозяйственного пользования водными ресурсами в регионах, испытывающих их недостаток и отличающихся неблагоприятными природно-климатическими условиями или антропогенной нагрузкой, связанной с интенсивным сельскохозяйственным производством, приводящей к истощению водных ресурсов. В работе [14] воспроизводились условия водоснабжения территорий муниципалитета Тауа (на северо-востоке Бразилии). Модель [3] создана как система поддержки принятия решений для управления водными ресурсами в регионах с их дефицитом на примере района бассейна реки Сан-Хоакин (Калифорния, США). В [21] имитировалась динамика землепользования и изменения почвенно-растительного покрова в процессе вырубки лесов в северо-восточном регионе Ганы, а также воспроизводились взаимодействия сельских жителей с природной средой с целью разработки рекомендаций по улучшению жизни населения региона и предотвращения истощения природных ресурсов. В [12] имитировались условия экстремальных климатических сценариев, таких как засуха, наводнение и т. п., с целью прогнозирования их влияния на социально-экономическую ситуацию (показатели урожайности, доходы фермеров, миграцию из сел в города) сельских регионов Таиланда. В [23] имитировалось влияние социального взаимодействия фермеров, которые сообща выбирают оптимальные стратегии использования земельных участков, на динамику землепользования и почвенно-растительного покрова в сельскохозяйственном регионе штата Монтана (США). В [15] на примере области Хохенлох, расположенной в юго-западной части Германии, изучалось влияние законодательной реформы 2003 г., связанной с переходом на новую систему дотационной поддержки сельского хозяйства и фермерства в странах Евросоюза, на динамику землепользования сельских территорий, условия развития фермерского производства и социально-экономическую

ситуацию региона. В [8] имитировалось влияние различных видов программ субсидирования фермеров на динамику землепользования и биоразнообразии экосистем, а также социально-экономические условия двух аграрных областей на севере и юге Швеции. В [24] оценивалось влияние производственной деятельности фермерских хозяйств и сельскохозяйственных предприятий на экологические условия Китая. Для этого на основе построенной социо-эколого-экономической АОМ сельского поселения вычислялись объемы твердых сельскохозяйственных отходов, выбросов вредных веществ (аммиака, азота, фосфора), химического потребления кислорода для расчета показателей суммарного уровня загрязнения водной и воздушной среды.

Для достижения цели создания максимально приближенных к реальности моделей, имитирующих социально-природные и социо-эколого-экономические системы исследуемых территорий (областей, регионов), в границах которых протекают различные антропогенные процессы, АОМ и МАС разрабатываются с привлечением геоинформационных технологий. Имитационное пространство моделей, созданных с привязкой к ГИС-координатам, отображает реальные пространственно-географические характеристики; статичные агенты (промышленные и сельскохозяйственные предприятия, стационарные источники загрязнения окружающей среды и т. п.) размещаются в пространстве в соответствии с их реальным территориальным местоположением, а динамичные агенты (население, транспортные средства и т. п.) перемещаются в соответствии с их индивидуальными маршрутами следования в пределах зоны их активности. Дополнительное преимущество использования ГИС-технологий заключается в возможности графического отображения разнородных проектных данных (экологической, градостроительной, технической и т. п. информации) для анализа их совместности, что облегчает работу по планирова-

нию природоохранных мероприятий и стратегии социально-экономического развития региона.

Информационно-аналитическая система, центральной компонентой которой является МАС влияния антропогенных нагрузок на тропические экосистемы и биологическое разнообразие острова Реюньон (заморский регион Франции в Индийском океане) [10], позволяет специалистам различных областей проверять совместимость экологической, градостроительной, технической и другой проектной документации. Кроме того, выходные данные модели, полученные в ходе имитирования различных антропогенных нагрузок (городской экспансии, увеличения сельскохозяйственного производства и туристического потока), помогают уполномоченным лицам планировать природоохранные мероприятия и стратегии социально-экономического развития региона. Система экологического регулирования и управления создана в рамках программы по охране заповедных территорий и сохранению биоразнообразия острова и состоит из двух частей: информационного блока, заключающего в себе большое количество разнородных данных (в том числе отображенных в графическом виде с привязкой к ГИС-координатам и структурированных в онтологию) обо всех экосистемах острова и блока прогнозирования и поддержки принятия решения, построенного с помощью платформы для мультиагентного моделирования социально-природных систем. Информационно-аналитическая система представляет собой среду для параллельной работы исследователей – специалистов различных областей над одним проектом посредством доступа к нему через локальную сеть. Кроме того, имеется возможность доступа к системе для широкого круга лиц через Интернет.

Моделирование крупномасштабных высокодетализированных социально-природных систем и антропогенных процессов, протекающих в их границах, подразумевает создание комплексной модели, в

которой воспроизводятся взаимодействия большого количества элементов, наделенных индивидуальными свойствами, характеристиками и алгоритмами поведения, что значительно усложняет расчеты и увеличивает их продолжительность. Таким образом, имитационное моделирование антропогенных процессов, протекающих в границах крупномасштабных социально-природных систем, стратегий социо-эколого-экономического развития регионов (стран, континентов), систем интерактивного мониторинга и контроля экологического состояния окружающей среды, напрямую связано с задачей увеличения производительности АОМ и МАС, решению которой способствует переход от последовательного имитационного моделирования к параллельному и распределенному, а также использование специализированных программно-аппаратных средств и суперкомпьютерных ресурсов для обеспечения параллельных вычислений.

Авторы АОМ [23] разработали алгоритм параллельных вычислений, который преобразовывает данные, разбивая их на группы, каждая из которых обрабатывается отдельными потоками на графических мультипроцессорах (GPU) суперкомпьютера. Для облегчения расчетно-вычислительных процессов использовалась программно-аппаратная архитектура CUDA (Compute Unified Device Architecture) компании NVIDIA, позволяющая эффективно управлять памятью графического ускорителя. В [19] представлена имитационная платформа, созданная для экологического агент-ориентированного моделирования, с помощью которой обеспечивается выполнение параллельных вычислений: специальный программный агент контролирует управление средствами моделирования, что обеспечивает возможность запуска множества потоков, одновременно прогоняя различные имитационные сценарии. Координирование потоков осуществляется пунктами синхронизации, обеспечивая обмен результатами между агентами и выбор наилучшего варианта для начала за-

пуска нового имитационного цикла. Верификация модели прошла на примере имитации природной среды района Санго Бей (Китай) для исследования влияния производства продукции аквакультуры на прибрежную экосистему.

Несмотря на видимое многообразие АОМ и МАС, созданных для имитирования социо-эколого-экономических систем и оценки антропогенного воздействия, сравнительный анализ показывает, что концептуальная конструкция моделей данного типа состоит из трех взаимосвязанных блоков: ландшафтного модуля – имитационного пространства, воспроизводящего природные характеристики исследуемых регионов (областей), поделенного на сегменты или ячейки, в границах которых функционируют агенты; модуля агентов – активных участников социо-эколого-экономической системы и производственной деятельности, которые взаимодействуют друг с другом и с природной средой в соответствии с их алгоритмами поведения; модуля рыночного регулирования. Имитационное пространство воспроизводит климатические особенности и природные характеристики региона, а каждый его сегмент – земельный участок или административно-территориальную единицу, которая наделяется индивидуальными параметрами (местоположение, приближенность к природным ресурсам или производственным объектам, показатели плодородия почв и урожайности, растительный покров, вид разрешенного землепользования, уровень загрязнения вредными веществами и т. д.). Агенты модели в зависимости от их принадлежности к определенным функциональным группам принимают решение о месте жительства, трудовой деятельности, стратегии развития производства, учитывая индивидуальные характеристики, которыми они наделены, и текущие экологические и экономические условия; последние задаются через модуль рыночного регулирования. Взаимосвязи индивидуальных параметров агентов и сегментов пространства позволяют имити-

ровать социально-природные взаимодействия и тестировать вариативные сценарии с целью прогнозирования последствий изменения климатических, природных, экологических, экономических, социальных условий, а также влияния на них законодательных инициатив, проектов инженерно-технического обеспечения территорий, природоохранных мероприятий и т. п.

Загрязнение окружающей среды: имитационное моделирование с использованием агентного метода

Дальнейшее социально-экономическое развитие общества связано с созданием благоприятных условий для его жизнедеятельности; соблюдением принципов экономного и рационального использования природных ресурсов; обеспечением экологической безопасности; предотвращением техногенных аварий и экологических катастроф; минимизацией негативного антропогенного воздействия производственной деятельности с постепенным переходом на экологизацию производства при помощи внедрения новейших эколого-ориентированных технологий, соответствующих современным экологическим стандартам; эффективным функционированием единой системы экологического мониторинга для оценки экологической ситуации и управления качеством окружающей среды. Информационно-аналитическое обеспечение процесса экологического мониторинга и подготовки принятия управленческих решений вызывает необходимость создания многорежимных распределенных систем управления, при помощи которых осуществляются сбор и обработка, накопление и обобщение разнородных данных о состоянии окружающей среды с целью выработки гипотез, прогнозов и сценариев управления экологической ситуацией. Информационная сложность потоков экологических данных, поступающих от систем мониторинга и контроля качества окружающей среды, затрудняет сопоставление, анализ и выявление наиболее значимых для принятия управленческих решений показателей и требует привлечения

возможностей современной вычислительной техники. Для того чтобы облегчить уполномоченным лицам задачи контроля и управления экологической ситуацией, создаются специализированные системы экологического мониторинга и контроля с модулем прогнозирования и поддержки принятия решений, ядром которых являются имитационные модели – симуляторы процессов антропогенного воздействия и загрязнения окружающей среды. Примером подобных информационных продуктов могут служить информационно-аналитические системы мониторинга состояния окружающей среды с функцией прогнозирования и поддержки принятия решений, разработанные с помощью мультиагентных технологий [13].

Анализ архитектуры и конструктивных особенностей социально-природных и социо-эколого-экономических имитационных моделей показывает, что комплексный характер задач, решаемых в рамках моделирования взаимовлияния компонентов системы «природа – общество» и связанных с ними процессов антропогенного воздействия на окружающую среду, зачастую требует разработки и использования специализированного программного обеспечения. В [4] представлена классификация программных продуктов для агентного моделирования социо-эколого-экономических систем, процессов антропогенного воздействия и загрязнения окружающей среды, систем мониторинга экологического состояния окружающей среды с функцией прогнозирования и поддержки принятия решений.

В соответствии с авторской классификацией программы и приложения можно разделить на три типа с учетом их назначения и метода применения агентного подхода. Вкратце изложим особенности их архитектуры:

1. Программное обеспечение (ПО) для построения моделей экологического мониторинга и контроля качества окружающей среды: агентный подход применяется для управления, объединения, восстановления

или распространения данных об экологическом состоянии окружающей среды – экологической информации. Агенты в моделях, созданных с использованием программ данного типа, обеспечивают управление системами информационных данных и выполняют пользовательские запросы, связанные с использованием неоднородных баз данных, а также взаимодействуют друг с другом с целью выборки нужных данных из общей онтологии. Кроме того, агенты могут выполнять экологическую оценку: обеспечивают ряд вычислений, используя информационные данные, например, расчеты по объемам выбросов вредных веществ.

2. ПО для построения экологических систем поддержки принятия решения: агентный подход в программах данного типа может применяться не для построения их общей конструкции (архитектуры), а только для блока (модуля) принятия решения. Использование подобных программ позволяет создавать модели, предназначенные для тестирования вариативных сценариев с целью определения оптимальной стратегии устойчивого развития территорий (регионов) и оценки проектов управления экосистемами и технологическими процессами.

3. ПО для имитирования комплексных социо-экологических и социо-эколого-экономических систем: агентный подход в программах данного типа используется для построения активных аналитических элементов имитационных процессов. Агенты в моделях, созданных с помощью подобных программ, представляют, как правило, активных участников социо-экологической системы – население, производственные предприятия, органы власти; они взаимодействуют друг с другом в соответствии с их поведенческими алгоритмами и оказывают влияние на природную среду, а ее динамические характеристики в свою очередь влияют на поведение агентов и социально-экономические показатели. Использование подобных программ позволяет создавать модели, пред-

назначенные для изучения характера взаимодействий компонентов социо-эколого-экономических систем, прогнозирования последствий различных экологических сценариев, оценки последствий антропологического воздействия на окружающую среду, исследования влияния природно-климатических особенностей на региональные социально-экономические условия и т. п.

Анализ разработанных МАС и систем экологического мониторинга и контроля, созданных с помощью мультиагентных технологий [6; 11; 18], показывает, что они имеют довольно сложную конструкцию, построенную на принципах объединения в распределенной среде моделирования разнофункциональных блоков (модулей), которые управляются и контролируются согласующимися агентами. Принципы построения архитектуры МАС зависят от вида экологического мониторинга и уровня задач, решаемых в его рамках. Как правило, основными конструктивными элементами МАС являются модуль подключенных к системе программ и приложений, с помощью которых выполняются разные типы задач; модуль сбора информационных данных, полученных от автоматических систем слежения за параметрами внешней среды и систем дистанционного зондирования; аналитический модуль обработки информации и знаний; модуль прогнозирования и поддержки принятия решения. Агенты в МАС могут принадлежать к двум типам: когнитивным, наделенным способностью к сознанию, или программным. Когнитивные агенты также принадлежат к двум разным функциональным типам: одни воспроизводят посредством поведенческих алгоритмов взаимодействие активных участников имитируемых социально-природных систем, другие же координируют выполнение сложных задач: анализируют и запускают причинно-следственные цепочки экологических процессов, контролируют качество обработки информационных данных и корректное функционирование всех аген-

тов системы, выбирают оптимальное приложение или подпрограмму для выполнения конкретной задачи и т. д. Программные агенты, не наделенные уровнем сознания, выполняют простые задачи: запускают качественно-количественные отношения между элементами системы, управляют иерархией всех подключенных к системе приложений и подпрограмм, анализируют корректность всех входящих и исходящих XML-сообщений. В МАС [6] физические объекты природной среды с их характеристиками и сенсоры (устройства, осуществляющие сбор разнородных экологических данных) представлены как программные агенты.

Полученные от автоматических систем слежения за параметрами внешней среды и обработанные в аналитическом блоке информационные данные структурируются и хранятся в базе данных, которая используется модулем прогнозирования и поддержки принятия решений. В информационном модуле МАС распространения нефтяных пятен в океанических водах [11] хранятся также ретроспективные данные: чтобы спрогнозировать динамику и направление распространения нефтяного пятна, в модуле прогнозирования и поддержки принятия решений сопоставляется информация обо всех предыдущих инцидентах и сравниваются характеристики и сценарии текущего инцидента с прошлыми. Система создавалась как интерактивный инструмент, способствующий эффективной координации работы спасателей с целью оптимизации ресурсов в ходе проведения мероприятий по предотвращению чрезвычайных ситуаций, связанных с разливом нефти в океанических водах, и минимизации экологического ущерба. Верификация модели осуществлялась на примере ретроспективного анализа данных инцидента, случившегося с судном «Престиж» в 2002 г. и ставшего крупнейшей экологической катастрофой в истории Испании и Португалии, повлекшей загрязнение тысяч километров прибрежных вод мазутом. В гибридной интеллектуальной

системе мониторинга и прогнозирования загрязнения воздушной среды [18] использован метод обучения искусственных нейронных сетей для вычисления показателей в тех случаях, когда часть сенсоров контрольно-измерительных станций, расположенных в центральной части города Афины (Греция), не функциональны и не выполняют передачу данных, поэтому в базе данных системы хранится также вся информация о характеристиках и параметрах нейронных сетей. В аналитическом модуле МАС температурного загрязнения атмосферы города Бари (Италия) [6] данные, полученные от температурных сенсоров спутников, обрабатываются и наделяются дополнительными информационными значениями, а программный агент модуля формирует комплексную онтологию баз данных.

С развитием научно-технического прогресса и интенсификацией хозяйственной деятельности человека стала возрастать роль антропогенных факторов и связанных с ними проблем ухудшения экологической обстановки, особенно в крупных промышленных городах и регионах. На первый план выходят вопросы, связанные с изучением различных аспектов воздействия экологических факторов на здоровье населения: исследование взаимосвязи концентрации вредных веществ в воздушной и водной среде и статуса здоровья населения; оценка риска здоровья населения вследствие увеличения объемов выбросов в окружающую среду и экономического ущерба вследствие повышения частоты заболеваемости и уровня смертности населения.

С помощью МАС [17] исследовалось влияние загрязнения воздушной среды города Сидней (показателей концентрации твердых примесей в воздухе) на состояние здоровья его населения (показатели смертности и частоты посещаемости медицинских учреждений) с учетом индивидуальных параметров интенсивности воздействия вредных веществ на агентов – горожан,

проживающих и перемещающихся в разных районах мегаполиса.

Конструкция МАС состоит из трех блоков:

- модуля загрязнения воздушной среды, в котором воспроизводится пространство города, поделенное на сектора, с привязкой к ГИС-координатам, и процесс распространения выбросов в воздушную среду с показателями приземной концентрации вредных веществ для каждого сектора;

- модуля населения города, в котором на основе статистических данных имитируется пространственное распределение населения и его внутридневные передвижения;

- аналитического модуля для вывода и визуализации полученных данных.

В процессе внутридневных передвижений агенты-горожане подвергаются определенному уровню воздействия вредных веществ в зависимости от продолжительности пребывания в конкретном сегменте города. Для оценки различных мер регулирования экологического состояния воздушной среды Сиднея прогонялись вариативные сценарии, связанные с увеличением и уменьшением показателей загрязненности воздушной среды. Результаты прогонов модели продемонстрировали, что снижение концентрации твердых примесей на 50% значительно уменьшает количество больничных дней, показатели смертности, случаи респираторных заболеваний и обращений в медицинские учреждения, что в конечном счете снижает финансовую нагрузку на бюджет.

Конструктивная особенность платформы комплексного анализа социо-эколого-экономических систем [22], созданной на основе принципов построения мультиагентной архитектуры, заключается в использовании междисциплинарного метода для анализа и сопоставления разнородной информации. Разнофункциональные блоки платформы представлены как активные агенты, ответственные за решение определенных типов задач: сбора и обработки конкретного вида информации, подготов-

ки предварительных данных для построения моделей разного типа (регрессионных, нейронной сети, полиномиальных), анализа выходных данных моделей и построения на их основе гибридных моделей, запуска компьютерных экспериментов, выявления критических параметров уровня загрязнения окружающей среды, выведения графической информации на экран. Для верификации платформы проведены компьютерные эксперименты с целью изучения влияния показателей уровня загрязнения окружающей среды на показатели заболеваемости (по видам болезней и возрастным когортам) и смертности населения. При этом использовались статистические данные области Кастилия-Ла-Манча (Испания) за период с 1989 по 2007 г. Платформа дает возможность составлять рекомендации для разработчиков нормативно-правовой экологической документации.

На долю автомобильного транспорта, являющегося основным источником загрязнения атмосферы, приходится более половины всех суммарных выбросов вредных веществ в воздушную среду, что оказывает негативное влияние на здоровье людей, в связи с чем актуальными становятся меры, направленные на снижение загрязнения атмосферы от выхлопов автотранспорта, как то: технологическое усовершенствование двигателей транспортных средств, применение альтернативных видов топлива, оснащение автомобилей устройствами снижения токсичности выхлопов, разработка и внедрение программно-аппаратных систем управления транспортом, в том числе с использованием GPS-навигаторов. Концептуальная АОМ [20], которую можно использовать в системах управления транспортом, построена для планирования маршрутов транспортных средств таким образом, чтобы уменьшить время ожидания на уличных перекрестках, так как наибольший уровень загрязнения воздуха отмечается в зонах расположения светофоров и перекрестков улично-дорожной сети. Агентами модели являются транспортные средства и дорож-

ные перекрестки, представленные как взаимосвязанные узлы, обменивающиеся информацией для оптимизации маршрута следования. Агенты – транспортные средства наделены прибором содействия управлению транспортным средством; агенты-перекрестки наделены сигнальным прибором регулирования движения. Приборы – контрольные блоки управления представляют собой сообщающиеся аппаратно-программные средства. Для вычислений расхода топлива в модели учитывались следующие параметры: скорость транспортных средств, объемы их двигателей, расход топлива во время ожидания на перекрестках, сила аэродинамического сопротивления. В ходе прогонов модели по сценарию дорожного трафика от 25 до 275 авто/час на каждой из четырех полос перекрестка со средней скоростью движения автотранспортных средств 50 км/ч сравнивались результаты включения разных механизмов оптимизирования маршрута. Использование модели в системах управления транспортными средствами может снизить расходы топлива и время ожидания на перекрестках от 28 до 98%.

Конструкция АОМ [16], созданная с помощью специализированной программной среды для моделирования транспортных систем, объединяет несколько взаимосвязанных моделей-модулей: транспортно-го движения, коэффициентов токсичности выхлопов, загрязнения воздушной среды. В модели имитируются сценарии внутридневного дорожно-транспортного движения города Мюнхен (Германия) для выявления связи между характеристиками: транспортного движения, такими как длительность следования, загруженность дороги, траектория движения и т. п.; типа движения – свободное, в плотном потоке, на перекрестке; объемами выбросов вредных веществ. Агенты (10% транспортных средств города Мюнхен) при запуске модели наделяются индивидуальными характеристиками автотранспортного средства – тип двигателя и т. п., маршрутом следования в соответствии с видом внут-

ридневных перемещений (внутри города, пригородные маятниковые поездки, коммерческие перевозки) и типом ездового цикла (продолжительность стоянки, средняя скорость движения, параметр разгона). Каждое звено маршрута следования посредством взаимосвязей модулей модели наделяется определенными параметрами ездового цикла и загрязнения воздушной среды – объемами выбросов. В модели используются данные статистики, GPS-навигаторов и методология расчетов по определению выбросов загрязняющих веществ от автотранспорта. Модель позволяет тестировать сценарии, связанные с административными и иными мерами, направленными на внедрение природоохранных технологий для снижения объемов выбросов от автотранспорта.

Промышленные предприятия являются источниками выбросов вредных веществ в воздушный бассейн, а их концентрация в границах крупных городов и сопредельных территорий представляет опасность для здоровья городских жителей, поэтому первоочередными задачами дальнейшего развития производства и совершенствования производственных технологий являются меры, направленные на обеспечение их соответствия современным природоохранным нормам и экологическим стандартам.

Модель [5], построенная путем объединения методов системной динамики и агент-ориентированного моделирования, создана с целью исследования взаимовлияния основных характеристик эколого-экономической системы на примере Республики Армения и разработки рекомендаций для административного регулирования экологического поведения промышленных объектов таким образом, чтобы мотивировать их к переходу на передовые, эколого-ориентированные технологии производства. В модели функционируют два типа агентов: промышленные объекты и органы власти. Последние оказывают влияние на первых через систему штрафов /субсидирования. Агенты – промышлен-

ные предприятия наделяются одним из следующих статусов: 1 – неэкологичное производство; 2 – ликвидация производства (закрытие предприятия); 3 – частичная модернизация; 4 – эколого-ориентированное производство. Переход предприятий с 3-го на 4-й статус возможен в случае их финансовых возможностей. При запуске модели агенты наделяются индивидуальными производственными и другими параметрами, а их начальное состояние устанавливается как 1-й статус. В процессе перехода к заключительному сценарию модернизации производства принимается во внимание стремление агентов максимизировать прибыль с одновременной минимизацией объемов выбросов. Модель объединяется с субъектно-ориентированной базой данных, содержащей актуальную информацию о промышленных объектах, расположенных в границах страны. Авторы модели пришли к выводу, что переход предприятий на экологически ориентированное производство возможен на условиях государственно-частного партнерства. Некоторые предприятия лучше законсервировать с одновременным строительством других, оснащенных эколого-ориентированными производственными технологиями.

В крупных городских образованиях концентрация парниковых газов, в том числе углекислого газа, основными источниками эмиссии которых являются промышленные объекты, электростанции, транспорт и люди, продолжает стремительно увеличиваться, ухудшая экологическую ситуацию. В модели [9] вычислялись объемы выбросов парниковых газов (углекислого газа) в границах двух мегаполисов – Манильской агломерации (Филиппины) и Нью-Йорка (США) – с целью прогнозирования сроков пригодности их среды для жизни населения. В модели тремя взаимосвязанными параметрами являются коэффициент годового прироста населения мегаполисов; объемы выбросов; финансовые средства, выделяемые государством для программ по снижению экологического

вреда. Агенты – жители мегаполисов распределяются по ячейкам имитационного пространства городов с заданными показателями объемов выбросов и финансовых средств. Агенты наделяются параметрами здоровья: имеющие высокий параметр – рождают детей, имеющие параметр, равный нулю, – умирают. Пригодность экосистемы мегаполисов для жизни возможна до тех пор, пока количество населения и уровень загрязнения воздушной среды не превысят установленные нормативы. Прогнозы модели показали, что при сохранении основных параметров системы на прежнем уровне пригодность экосистемы Манильской агломерации сохранится до 2067 г., а Нью-Йорка – до 2064 г. Модель можно использовать для оценки экологической ситуации городов и планирования экологических программ и бюджетных расходов, связанных с их реализацией.

Выводы

Агентное моделирование успешно применяется для изучения комплексного характера социально-природных процессов и решения широкого круга задач, связанных с оценкой антропогенного воздействия на экосистемы, планированием эффективных природоохранных мероприятий, прогнозированием последствий изменения природных и экологических условий, поиском оптимальных стратегий устойчивого экономического развития общества с соблюдением принципов экологической безопасности. Анализ конструктивных особенностей разнообразных социально-природных и социо-эколого-экономических моделей, созданных с помощью агент-ориентированного подхода или с привлечением мультиагентных технологий, показал, что их можно условно разделить на две большие группы, каждая из которых представлена моделями разного типа в соответствии с концептуальными идеями построения имитационного процесса или цели исследования.

Первая группа представлена моделями, в которых воспроизводятся антропогенные

процессы, и моделями взаимодействия компонентов системы «природа – общество» с целью:

– изучения характера взаимовлияния и взаимозависимостей компонентов социально-природных систем;

– оценки последствий социально-природных взаимодействий, прогнозирования социально-экономических условий под влиянием природных, климатических, экологических параметров или, наоборот, экологических последствий антропогенного воздействия;

– воссоздания комплексной взаимосвязанной структуры социо-эколого-экономических систем, сочетающей природные, производственные, демографические и другие элементы, функционирующие в границах исследуемых территорий или регионов для тестирования вариативных сценариев устойчивого развития.

Вторая группа представлена моделями, в которых имитируются процессы загрязнения окружающей среды вредными веществами и оцениваются экологическая ситуация и влияние экологических условий на состояние здоровья населения исследуемых территорий (регионов). К этой группе относятся модели, созданные для:

– экологического мониторинга и контроля качества окружающей среды с функцией прогнозирования и поддержки принятия решений с целью оценки и интерактивного управления экологической ситуацией, эффективной координации работы спасателей и оптимизирования ресурсов в ходе предотвращения чрезвычайных ситуаций;

– оценки рисков здоровья населения, изучения различных аспектов воздействия

экологических факторов на здоровье населения, разработки интеллектуальных систем и механизмов, способствующих снижению объемов выбросов.

Для достижения цели создания моделей, максимально приближенных к реальности, имитационное пространство которых будет отображать реальные пространственно-географические характеристики социально-природных систем, агент-ориентированные и мультиагентные модели разрабатываются с привлечением геоинформационных технологий. Моделирование крупномасштабных высокодетализированных систем и процессов, связанных с изучением социально-экологических проблем взаимодействия общества и природы, поиском стратегий социо-эколого-экономического развития регионов (стран, континентов), создания систем интерактивного управления качеством окружающей среды, напрямую связано с задачей увеличения производительности моделей, решению которой способствует переход от последовательного имитационного моделирования к параллельному и распределенному, а также использование специализированных программно-аппаратных средств и суперкомпьютерных ресурсов для обеспечения параллельных вычислений.

Обзор моделей и полученные в процессе анализа их конструктивных особенностей выводы представляют интерес для нашей дальнейшей работы по имитированию загрязнения окружающей среды, оценки влияния экологической нагрузки на здоровье населения региона и апробации различных природоохранных стратегий на базе разработанных моделей [1; 2].

Список литературы

1. Макаров В. Л., Бахтизин А. Р., Сушко Е. Д. Агент-ориентированная социо-эколого-экономическая модель региона // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. – 2015. – № 3 (288). – С. 2–11.

2. Макаров В. Л., Бахтизин А. Р., Сушко Е. Д. Регулирование промышленных выбросов на основе агент-ориентированного подхода // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. – 2017. – Т. 10. – № 6. – С. 42–58.

3. Akhbari M. Models for Management of Water Conflicts: a Case Study of the San-Joaquin Watershed, California. PhD thesis / Colorado State University. Fort Collins. – Colorado, 2012.
4. Athanasiadis I. N. A Review of Agent-Based Systems Applied in Environmental Informatics // Zerger A., Argent R. M. (eds.). MODSIM 2005. International Congress on Modelling and Simulation. Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand. – Melbourne, 2005. – P. 1574–1580.
5. Beklaryan L. A., Akopov A. S., Beklaryan A. L., Saghatelyan A. K. Agent-Based Simulation Modeling for Regional Ecological-Economic Systems. A case study of the Republic of Armenia // Machine Learning and Data Analysis. – 2016. – Vol. 2. – Issue 1. – P. 104–115.
6. Borri D., Camarda D. Planning for the Environmental Quality of Urban Microclimate: a Multi-Agent-Based Approach // Lecture Notes in Computer Science. – 2011. – Vol. 6874. – P. 129–136.
7. Bousquet F., Trebuil G., Hardy B. (eds). Companion Modeling and Multi-Agent Systems for Integrated Natural Resource Management in Asia. Los Bacos. – Philippines : International Rice Research Institute, 2005.
8. Brady M., Sahrbacher C., Kellermann K., Happe K. An Agent-Based Approach to Modeling Impacts of Agricultural Policy on Land Use, Biodiversity and Ecosystem Services // Landscape Ecology. – 2012. – Vol. 27 (9). – P. 1363–1381.
9. Cartel J. E., Clutario W. A. Socio-Environmental Agent-Based Simulation on the Livability of Two Cities // Journal of Science, Engineering and Technology. – 2016. – N 4. – P. 44–59.
10. Conruyt N., Sébastien D., Courdier R., David D., Sébastien N., Ralambondrainy T. Designing an Information System for the Preservation of the Insular Tropical Environment of Reunion Island Integration of Databases, Knowledge Bases and Multi-Agent Systems by Using Web Services // Advanced Agent-Based Environmental Management Systems. – 2009. – P. 61–90.
11. Corchado J. M., Mata A., Rodriguez S. OSM: a Multi-Agent System for Modeling and Monitoring the Evolution of Oil Slicks in Open Oceans // Advanced Agent-Based Environmental Management Systems. – 2009. – P. 91–117.
12. Entwisle B., Williams N. E., Verdery A. M. et al. Climate Shocks and Migration: an Agent-Based Modeling Approach // Population and Environment. – 2016. – Vol. 38. – Issue 1. – P. 47–71.
13. Ghazi S., Khadir T., Dugdale J. Multi-Agent Based Simulation of Environmental Pollution Issues: a Review // Communications in Computer and Information Science. – 2014. – N 430. – P. 13–21.
14. Gunkel A. The Application of Multi-Agent Systems for Water Resources Research – Possibilities and limits : Diploma thesis / Institut für Hydrologie der Albert-Ludwigs-Universität. – Freiburg, 2005.
15. Happe K., Kellermann K., Balmann A. Agent-Based Analysis of Agricultural Policies: an Illustration of the Agricultural Policy Simulator AgriPoliS, its Adaptation and behavior // Ecology and Society. – 2006. – Vol. 11 (1): 49 [online]. – URL: <http://www.ecologyandsociety.org/vol11/iss1/art49/>
16. Hülsmann F. Integrated Agent-Based Transport Simulation and Air Pollution Modeling in Urban Areas – the Example of Munich. Dissertation / Technischen Universität. – München, 2014.
17. Newth D., Gunasekera D. An Integrated Agent-Based Framework for Assessing Air Pollution Impacts // Journal of Environmental Protection. – 2012. – N 3. – P. 1135–1146.
18. Papaleonidas A., Iliadis L. Hybrid and Reinforcement Multi-Agent Technology for Real Time Air Pollution Monitoring // Advances in Information and Communication Technology. – 2012. – Vol. 381. – P. 274–284.
19. Pereira A., Reis L. P., Duarte P. EcoSimNet: A Multi-Agent System for Ecological Simulation and Optimization // Lecture Notes in Computer Science. – 2009. – Vol. 5816. – P. 473–484.

20. Pulter N., Schepperle H., Böhm K. How Agents Can Help Curbing Fuel Combustion: a Performance Study of Intersection Control for Fuel-Operated Vehicles // Proceedings of 10th International Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems – Innovative Applications Track. 2–6 May 2011. – Taipei, Taiwan, 2011. – P. 795–802.

21. Shindler J. A Multi-Agent System for Simulating Land-Use and Land-Cover Change in the Atankwidi Catchment of Upper East Ghana. PhD thesis / Rheinischen Friedrich Wilhelms Universität. – Bonn, 2009.

22. Sokolova M. V., Fernández-Caballero A. Evaluation of Environmental Impact Upon Human Health with DeciMaS Framework // Expert Systems with Applications. – 2012. – N 39. – P. 3469–3483.

23. Tang W., Bennett D. A. Parallel Agent-Based Modelling of Land-Use Opinion Dynamics Using Graphics Processing Units // Journal of Land Use Science. – 2009. – N 6. – P. 121–135.

24. Yang S., Qu H., Luan S., Kroeze C. Environmental Implications of Rural Policies in China: a Multi-Agent Model at the Level of Agricultural Households // Journal of Integrative Environmental Sciences. – 2014. – Vol. 11. – Issue 1. – P. 17–37.

References

1. Makarov V. L., Bahtizin A. R., Sushko E. D. Agent-orientirovannaya socio-ekologo-ekonomicheskaya model' regiona [An Agent-Oriented Social-Ecological-Economic Model of a region]. *Nacional'nye interesy: priority i bezopasnost'* [National Interests: Priorities and Security], 2015, No. 3 (288), pp. 2–11. (In Russ.).

2. Makarov V. L., Bahtizin A. R., Sushko E. D. Regulirovanie promyshlennykh vybrosov na osnove agent-orientirovannogo podhoda [Regulation of Industrial Emissions Based on the Agent-Based Approach]. *Ekonomicheskie i social'nye peremeny: fakty, tendencii, prognoz* [Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast], 2017, Vol. 10, No. 6, pp. 42–58. (In Russ.).

3. Akhbari M. Models for Management of Water Conflicts: a Case Study of the San-Joaquin Watershed, California. PhD thesis. Colorado State University. Fort Collins. Colorado, 2012.

4. Athanasiadis I. N. A Review of Agent-Based Systems Applied in Environmental Informatics. Zerger A., Argent R. M. (eds.). *MODSIM 2005. International Congress on Modelling and Simulation. Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand*. Melbourne, 2005, pp. 1574–1580.

5. Beklaryan L. A., Akopov A. S., Beklaryan A. L., Saghatlyan A. K. Agent-Based Simulation Modeling for Regional Ecological-Economic Systems. A case study of the Republic of Armenia. *Machine Learning and Data Analysis*, 2016, Vol. 2, Issue 1, pp. 104–115.

6. Borri D., Camarda D. Planning for the Environmental Quality of Urban Microclimate: a Multi-Agent-Based Approach. *Lecture Notes in Computer Science*, 2011, Vol. 6874, pp. 129–136.

7. Bousquet F., Trebil G., Hardy B. (eds). *Companion Modeling and Multi-Agent Systems for Integrated Natural Resource Management in Asia*. Los Bacos. Philippines, International Rice Research Institute, 2005.

8. Brady M., Sahrbacher C., Kellermann K., Happe K. An Agent-Based Approach to Modeling Impacts of Agricultural Policy on Land Use, Biodiversity and Ecosystem Services. *Landscape Ecology*, 2012, Vol. 27 (9), pp. 1363–1381.

9. Cartel J. E., Clutario W. A. Socio-Environmental Agent-Based Simulation on the Livability of Two Cities. *Journal of Science, Engineering and Technology*, 2016, No. 4, pp. 44–59.

10. Conruyt N., Sébastien D., Courdier R., David D., Sébastien N., Ralambondrainy T. Designing an Information System for the Preservation of the Insular Tropical Environment of Reunion Island Integration of Databases, Knowledge Bases and Multi-Agent Systems by Using Web Services. *Advanced Agent-Based Environmental Management Systems*, 2009, pp. 61–90.

11. Corchado J. M., Mata A., Rodriguez S. OSM: a Multi-Agent System for Modeling and Monitoring the Evolution of Oil Slicks in Open Oceans. *Advanced Agent-Based Environmental Management Systems*, 2009, pp. 91–117.
12. Entwisle B., Williams N. E., Verdery A. M. et al. Climate Shocks and Migration: an Agent-Based Modeling Approach. *Population and Environment*, 2016, Vol. 38, Issue 1, pp. 47–71.
13. Ghazi S., Khadir T., Dugdale J. Multi-Agent Based Simulation of Environmental Pollution Issues: a Review. *Communications in Computer and Information Science*, 2014, No. 430, pp. 13–21.
14. Gunkel A. The Application of Multi-Agent Systems for Water Resources Research – Possibilities and limits. Diploma thesis. Institut für Hydrologie der Albert-Ludwigs-Universität. Freiburg, 2005.
15. Happe K., Kellermann K., Balmann A. Agent-Based Analysis of Agricultural Policies: an Illustration of the Agricultural Policy Simulator AgriPoliS, its Adaptation and behavior. *Ecology and Society*, 2006, Vol. 11 (1): 49 [online]. Available at: <http://www.ecologyandsociety.org/vol11/iss1/art49/>
16. Hülsmann F. Integrated Agent-Based Transport Simulation and Air Pollution Modeling in Urban Areas – the Example of Munich. Dissertation. Technischen Universität. München, 2014.
17. Newth D., Gunasekera D. An Integrated Agent-Based Framework for Assessing Air Pollution Impacts. *Journal of Environmental Protection*, 2012, No. 3, pp. 1135–1146.
18. Papaleonidas A., Iliadis L. Hybrid and Reinforcement Multi-Agent Technology for Real Time Air Pollution Monitoring. *Advances in Information and Communication Technology*, 2012, Vol. 381, pp. 274–284.
19. Pereira A., Reis L. P., Duarte P. EcoSimNet: A Multi-Agent System for Ecological Simulation and Optimization. *Lecture Notes in Computer Science*, 2009, Vol. 5816, pp. 473–484.
20. Pulter N., Schepperle H., Böhm K. How Agents Can Help Curbing Fuel Combustion: a Performance Study of Intersection Control for Fuel-Operated Vehicles. *Proceedings of 10th International Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems – Innovative Applications Track. 2–6 May 2011. Taipei, Taiwan, 2011*, pp. 795–802.
21. Shindler J. A Multi-Agent System for Simulating Land-Use and Land-Cover Change in the Atankwidi Catchment of Upper East Ghana. PhD thesis. Rheinischen Friedrich Wilhelms Universität. Bonn, 2009.
22. Sokolova M. V., Fernández-Caballero A. Evaluation of Environmental Impact Upon Human Health with DeciMaS Framework. *Expert Systems with Applications*, 2012, No. 39, pp. 3469–3483.
23. Tang W., Bennett D. A. Parallel Agent-Based Modelling of Land-Use Opinion Dynamics Using Graphics Processing Units. *Journal of Land Use Science*, 2009, No. 6, pp. 121–135.
24. Yang S., Qu H., Luan S., Kroeze C. Environmental Implications of Rural Policies in China: a Multi-Agent Model at the Level of Agricultural Households. *Journal of Integrative Environmental Sciences*, 2014, Vol. 11, Issue 1, pp. 17–37.

Сведения об авторе

Алина Фагимовна Агеева

кандидат архитектуры, ведущий инженер
Лаборатории компьютерного моделирования
социально-экономических процессов
ЦЭМИ РАН.
Адрес: ФГБУН Центральный экономико-
математический институт Российской
академии наук, Москва, 117418,
Нахимовский проспект, д. 47.
E-mail: ageevaalina@yandex.ru

Information about the author

Alina F. Ageeva

PhD, Advanced Engineer of Laboratory
of Computer Modeling of Socio-Economic
Processes of the CEMI RAS.
Address: Central Economics and Mathematics
Institute of the Russian Academy of Sciences,
47 Nahimovskiy prospekt,
Moscow, 117418,
Russian Federation.
E-mail: ageevaalina@yandex.ru