

Швецов Анатолий Николаевич

Доктор технических наук, профессор,
Вологодский государственный университет
(Вологда, Россия)
E-mail: smithv@mail.ru

Shvetsov Anatolii Nikolaevich

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Vologda State University
(Vologda, Russia)
E-mail: smithv@mail.ru

Дианов Сергей Владимирович

Кандидат технических наук,
Вологодский государственный университет
(Вологда, Россия)
E-mail: dianov.sv@mail.ru

Dianov Sergey Vladimirovich

PhD in Technical Sciences,
Vologda State University
(Vologda, Russia)
E-mail: dianov.sv@mail.ru

**МЕТОДИКА РАЗРАБОТКИ
АГЕНТ-ОРИЕНТИРОВАННЫХ
МОДЕЛЕЙ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ**

**METHODOLOGY
OF DEVELOPMENT
OF AGENT-ORIENTED MODELS
OF COMPLEX SYSTEMS**

Аннотация. Анализируется опыт создания агент-ориентированных моделей сложных систем социально-экономической сферы с точки зрения используемых методик. Представлены подходы, адаптирующие метаметодологию построения агент-ориентированных систем к разработке моделей сложных систем на этапе синтеза их концептуальной структуры. Описана методика нахождения оптимальной структуры агентов, представляющих собой агрегированные сущности. Предлагаемый подход использует интенциональную и экстенциональную модели предметной области и обеспечивает приемлемое соотношение между точностью представления исследуемой системы и необходимыми вычислительными ресурсами.

Abstract. The article considers the existing approaches to the construction of agent-oriented models of socio-economic systems from the point of view of the applied methods. One represents the approaches, adapting the metamethodology of agent-oriented systems' building to the development of complex systems' models on the stage of their conceptual structures' synthesis. The authors describe the issues of finding the optimal structure of agents, representing aggregated entities. The given approach uses the intensional and extensional models of the application domain and provides the acceptable relation between the required accuracy of the investigated system and the necessary computing resources.

Ключевые слова: агент-ориентированные модели, сложные системы, мультиагентные системы

Keywords: agent-oriented models, complex systems, multi-agent systems

Работа поддержана грантами РФФИ № 18-47-350001 р-а и № 17-06-00514 А.

Введение

Отличительной особенностью современных систем управления является необходимость обеспечения принятия решений на основе анализа огромного количества параметров разнообразных по своей природе элементов, образующих сложный про-

пространственно-временной комплекс. В этих условиях особое значение для обеспечения качества решений приобретает использование имитационных моделей. На сегодняшний день существует множество подходов к их созданию, обеспечивающих разную степень адекватности и точности в зависимости от сложности исследуемой системы и целей моделирования. Но все более широкое распространение получает агент-ориентированный подход. Это связано с двумя основными моментами: во-первых, его парадигма близка по своей сути к тому, как реализуются процессы в реальных системах; во-вторых, он позволяет осуществить переход от мономоделей (одна модель – один алгоритм) к мультимоделям (одна модель – множество независимых алгоритмов) [7], что обеспечивает большую эффективность процесса создания модели.

Обратной стороной такого подхода является необходимость обеспечения взаимосвязей мультимоделей, а это неизбежно влечет за собой необходимость использования строгой методики, позволяющей управлять всем процессом создания модели с целью исключения рассогласованности ее отдельных элементов. Построение моделей сложных систем должно изначально выстраиваться с точки зрения всеобъемлющего их рассмотрения, учета всевозможных деталей и специфики предметной области. Поэтому важнейшей задачей при построении агент-ориентированных моделей является определение общих подходов к формированию состава агентов и созданию среды их функционирования.

Возникает необходимость качественной идентификации элементов модели, определения методов и форм их абстрактного представления, при котором будет обеспечена возможность описания механизмов их взаимодействия, формирования входных воздействий и получения требуемых результатов. При этом необходимо учитывать влияние пространственных факторов размещения элементов, а также многоуровневый аспект в моделях их поведения.

Следует также понимать, что техническая реализация столь масштабных моделей требует значительных ресурсов. И вопросы, связанные с нахождением оптимального соотношения между требуемой точностью модели и доступными ресурсами, также должны решаться на методологическом уровне.

Основная часть

На сегодняшний день самый значительный опыт создания сложных агент-ориентированных моделей накоплен применительно к социально-экономическим системам [5], [7], [10]. При их разработке, как правило, авторы ориентируются на использование классических подходов к имитационному моделированию. В качестве его основных этапов определены [8]: анализ системы; формулировка цели моделирования системы; разработка концептуальной структуры модели; ее реализация в среде моделирования; реализация анимационного представления модели; проверка корректности ее реализации; калибровка модели; планирование и проведение компьютерного эксперимента.

Осознавая специфику агент-ориентированной модели, большинство авторов уделяют особое внимание разработке ее концептуальной структуры [9]. Отмечается, что для реализации агентных моделей разработчикам необходимо преодолеть сложнос-

ти, связанные с определением типов агентов, их количества и характеристик, с пониманием механизма взаимодействия агентов друг с другом и с внешней средой [8].

В работе [9] утверждается, что на этапе разработки концептуальной модели обосновывается и защищается ее идея, представляется авторский взгляд на моделируемые процессы, формулируются основные допущения и упрощения, принятые в модели. В практическом плане здесь осуществляется декомпозиция системы, выполняется ее структурный анализ, обсуждается необходимый уровень детализации объектов и процессов, формулируются гипотезы и допущения. Этап разработки концептуальной модели считается завершенным, если описаны и обоснованы: общая концепция агент-ориентированной модели; ее основные допущения и структура; характеристики и виды агентов; поведение агентов в модели; внешняя среда; способ формализации модели.

Анализ существующих подходов, использованных при создании агент-ориентированных моделей, показывает, что в большинстве из них существуют определенные проблемы при формировании структуры элементов. Это связано в первую очередь с тем, что генерация сущностных компонентов модели носит субъективный характер и целиком отдается на откуп субъекту моделирования. При этом, как правило, используется ограниченное число методик, ориентированных на создание автоматизированных систем, не учитывающих специфику создания моделей.

Одна из наиболее разработанных методик представлена в работе [3]. Автором предлагается использование агент-ориентированного подхода в качестве одного из элементов комплексной модели для исследования региональных социально-экономических систем в совокупности с концептуальным и системно-динамическим моделированием. Концептуальная модель является интегрирующей основой для остальных типов моделей, которые в данной схеме играют определенную роль: системно-динамическая модель используется для исследования глобальных, а агент-ориентированная – локальных тенденций развития социально-экономической системы. При разработке концептуальной модели используется функционально-целевой подход, задачей которого является формирование структуры многоуровневой древовидной системы целей и их согласование с функциями, обеспечивающими достижение целей. Дерево целей используется для синтеза агент-ориентированной модели, заключающегося в выполнении его декомпозиции до тех пор, пока не будет достигнут уровень «примитивных» целей, реализуемых агентами с простыми алгоритмами. Достижение агентами примитивных целей различных уровней в конечном счете обеспечивает достижение глобальной цели исследуемой системы.

По результатам проведенного анализа можно констатировать, что на сегодняшний день существует потребность в разработке комплексных методик создания агент-ориентированных моделей.

Поэтому целесообразно рассмотреть более богатый опыт методологий разработки мультиагентных систем (МАС), ориентированных на решение прикладных задач. Исследования существующих методик разработки МАС представлены в работах [1], [2], [4].

Их наиболее подробное описание представлено в работе [11], где существующие подходы разделены на четыре класса:

- базирующиеся на объектно-ориентированных методах и технологиях с использованием соответствующих расширений (Agent UML, P2P Agent Platform, ADELFE, INGENIAS, O-MASE);
- использующие традиционные методы инженерии знаний (MAS Common-KADS);
- основанные на организационно-ориентированных представлениях (Gaia, ПВ-сети, М-архитектура, SODA, ANEMONA, ASPECS, GORMAS, ROMAS);
- комбинирующие в различной степени методы трех первых классов (Tropos, PASSI, Prometheus).

Проведенные исследования показывают, что выбор методологии агент-ориентированного проектирования, адекватной решаемым разработчиками проблемам, остается сложной трудноформализуемой задачей. Для компаний и организаций, разрабатывающих агент-ориентированное программное обеспечение, предметная область проекта может существенно влиять на выбор используемых методологий.

В качестве основы методики создания агент-ориентированных моделей авторы используют метаметодологию, предложенную в [11], охватывающую различные пространства модельного представления сложных систем.

Метаметодология направлена на создание мультиагентных интеллектуальных систем (МАИС), отражающих выбранное подпространство реального или виртуального мира во всей возможной полноте его эмпирически проявленных и не проявленных свойств. Для этого предлагается использовать понятие «модельное пространство мира» (МПМ) как высокоуровневый гносеологический концепт, охватывающий ту часть реальности, которая будет отражаться или моделироваться МАИС, и компоненты внешней среды, которые существуют в онтологическом единстве с МАИС. Особенностью метаметодологии является включение в область изменчивой действительности как реальных, так и виртуальных миров, которые уже являются информационными представлениями других миров (возможно, также виртуальных). Таким образом, возникает многоуровневое вложенное представление о мире, в котором существуют и действуют физические и информационные сущности.

Отправной точкой метаметодологии является выделение интересующего нас фрагмента действительности, моделируемого подпространства реального или виртуального мира. Это модельное пространство находит свои отражения в когнитивных пространствах экспертов данной предметной области или нескольких областей, в эмпирических портретах системы, находящейся внутри МПМ, в вербальных описаниях (тексты, документы), в имеющихся ранее полученных формализованных или формальных моделях фрагментов МПМ. К этим отражениям применяются соответствующие методы извлечения знаний – коммуникативные, системологические, текстологические. В результате формируется концептосфера МПМ, содержащая множество концептов, объективно присущих рассматриваемой предметной области, их возможные свойства и отношения. Также выявляются модельные представления, проекции концептосферы в различных аспектах существования, определяющие

классы моделей, необходимых для адекватного описания МПМ (поведенческие, иерархические, социальные, логические). Эти модели определяют структуру конкретной методологии, необходимой для построения МАИС в данной области.

По собранным эмпирическим данным выполняется системная реконструкция МПМ в соответствии с концепцией физики систем, позволяющая доказательно выявить значимые концепты, свойства и атрибуты, установить наличие отношений между концептами, определить меру их взаимосвязи. Определение локальностей по статистическим данным позволяет обосновать иерархию концептов в МПМ, установить структуру концептуального пространства. Выполнение системного анализа по имеющимся временным срезам МПМ позволяет сформировать динамические, социальные и эволюционные образы.

На этапе синтеза концептуальной структуры модели целесообразно отталкиваться от параметров процесса работы с моделью (рис. 1).

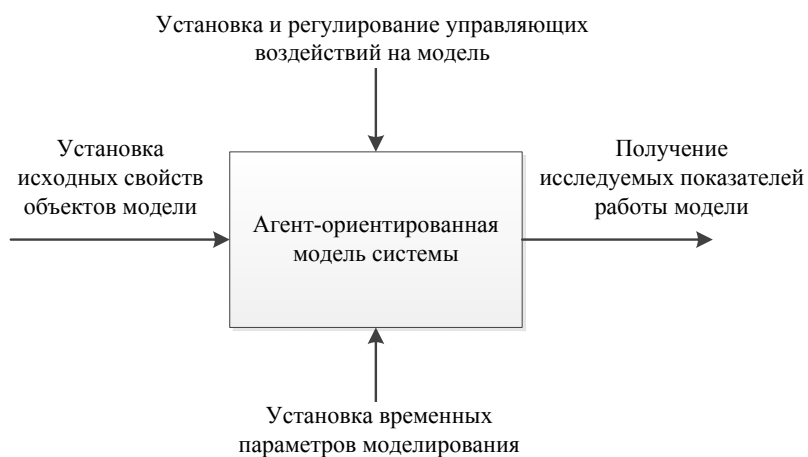


Рис. 1. Процессы работы с агент-ориентированной моделью

В общем случае имеется четыре группы таких параметров: исходные свойства элементов модели, временной шаг и общее время моделирования, управляющие воздействия, исследуемые показатели работы модели. Первые две группы параметров не оказывают влияния на ее структуру. Управляющие воздействия (при их наличии) в конечном счете являются производными от исследуемых показателей работы модели, принадлежность которых определяет верхний набор ее объектов. Исходя из этого, на первом шаге формирования концептуальной структуры модели определяются объекты, содержащие атрибуты, непосредственно формирующие ее исследуемые показатели.

Далее для всех пар «объект – атрибут» каждого идентифицированного на первом шаге объекта определяется перечень процессов, с которыми связано изменение значений соответствующих атрибутов. Для всех процессов определяются субъекты реа-

лизации, которые, по своей сути, представляют собой следующий набор идентифицированных объектов модели.

На следующем шаге для каждой связки «субъект – процесс» определяются три блока атрибутов: целеустанавливающие, инициализирующие и формирующие. Целеустанавливающие атрибуты формируют мотивационную составляющую запуска процесса. Их наличие определяет принадлежность соответствующего объекта к классу агентов. Инициализирующие атрибуты участвуют в описании ситуации, при которой становится возможным запуск процесса. Формирующие атрибуты определяют степень воздействия процесса на изменяемый атрибут. Для выявленных атрибутов целеустанавливающего, инициализирующего и формирующего блоков определяется их принадлежность к существующим или новым объектам модели.

Каждый новый объект анализируется на его принадлежность к моделируемой системе. В случае положительного решения продолжается идентификация объектов системы на его основе. При отрицательном решении выявленному объекту присваивается статус объекта внешней среды и дальнейшей идентификации воздействующих на его атрибуты процессов не производится, однако в его структуру могут вводиться дополнительные атрибуты, выявляемые в результате анализа новых идентифицируемых внутренних объектов моделируемой системы.

Процесс идентификации составляющих концептуальной структуры модели завершается на шаге, при котором не появляется новых связок «объект – атрибут».

Вариант графической интерпретации подхода представлен на рис. 2. Целью модели является изучение динамики объема древесной массы на лесном участке. Данный показатель рассчитывается на основе значений атрибутов «средняя высота ствола», «средняя ширина ствола», «количество деревьев объекта древостой».

На следующем этапе формируется пространственная структура элементов модели. Здесь определяется набор участков размещения объектов модели, задается система координат и в соответствии с ней определяется размещение участков. Далее происходит размещение выявленных объектов модели в каждом из участков. На заключительном шаге определяется степень воздействия элементов каждого из участков на элементы других участков, исходя из их взаимного расположения и значений атрибутов размещенных на них объектов.

Формализация моделей МПМ выполняется с применением идеологии фрейм-концептов [12] и механизма сценариев, генерируемых во взаимодействии поведенческих, социальных и эволюционных проекций.

Идентифицированные в концептуальной структуре модели процессы позиционируются в качестве сценариев. Для их реализации в структуре фрейм-концептов формируются модули. Наполнение модулей связано с необходимостью анализа большого количества разнообразных параметров элементов модели. При этом в большом количестве ситуаций не существует четких алгоритмов вывода. Для реализации модулей авторы предлагают использовать нечеткие нейронные сети.

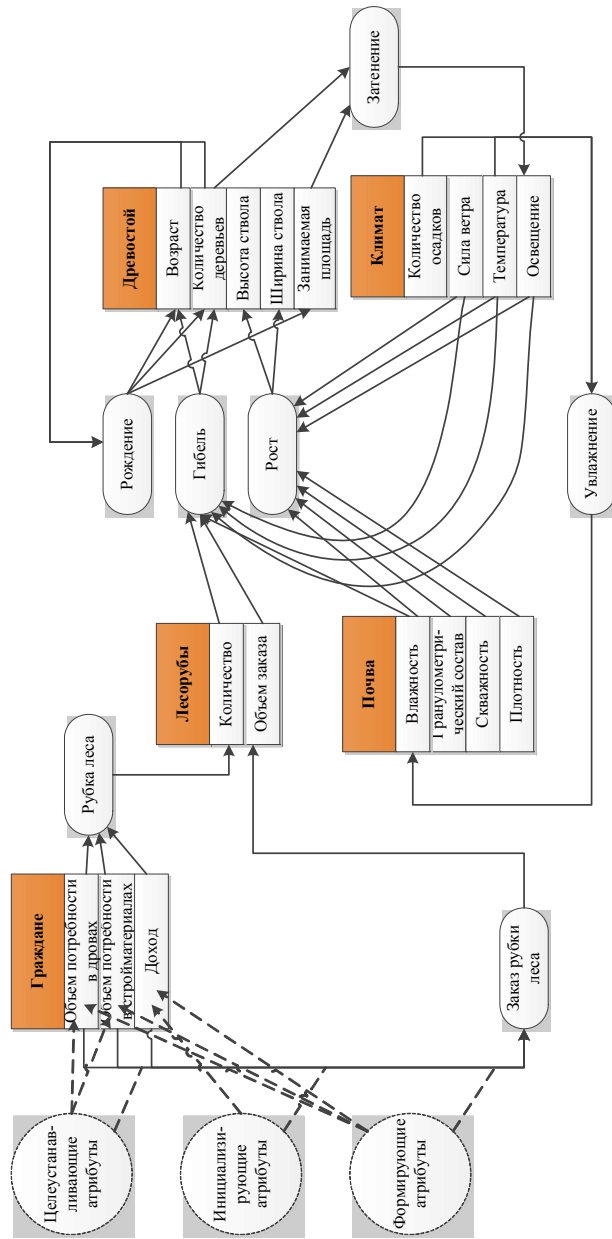


Рис. 2. Пример графической интерпретации процесса идентификации составляющих концептуальной структуры агент-ориентированной модели

На этапе реализации модели важно обеспечить приемлемое соотношение точности и имеющихся для ее реализации вычислительных ресурсов. Для этих целей используются понятия «интенциональная модель» и «экстенциональная модель» [11].

Под действующей моделью МПМ (ДМ-МПМ) понимается программная или программно-аппаратная модель, реализующая в информационном или физическом смысле основные аспекты поведения МПМ. Функционирование такой модели в модельном времени позволяет проанализировать поведение МАИС на множестве модельных ситуаций, которые, возможно, еще не были известны в действительности, но существуют как потенция МПМ. Функционирование ДМ-МПМ в реальном времени становится возможным, если вместо внутренних моделей агентов информационной среды к МАИС подключаются реальные информационные или физические агенты. Тогда становится возможным параллельное функционирование двух действующих моделей МПМ: интенциональной (замкнутой) (ИМ), напрямую не зависящей от реального мира; экстенциональной (разомкнутой) (ЭМ), непосредственно связанной с реальным миром.

Одной из ключевых проблем, которые необходимо решить при построении агент-ориентированных моделей, является определение оптимальности ее архитектуры. Идеальная с точки зрения адекватности и точности получаемых результатов агент-ориентированная модель должна отображать поведение каждой из существующих в исследуемой предметной области единичных сущностей. Но такой подход требует значительных затрат различных ресурсов (временных, вычислительных и т.п.). Зачастую при создании моделей можно обойтись обобщением (агрегацией) определенного массива похожих по поведению субъектов к одной сущности, которая, с одной стороны, интегрирует в общие параметры значения свойств субъектов, а с другой – усиливает пропорционально количеству входящих в нее субъектов силу воздействия на внешние системы. Следует иметь в виду, что такое обобщение не должно приводить к формированию системы, у которой появились бы новые качества.

При проведении обобщения в агент-ориентированных моделях возникает проблема нахождения наиболее оптимального варианта осуществления данной операции. В любом случае принятый вариант оказывает решающее влияние на формирование общей архитектуры агент-ориентированной модели.

Отравной точкой проведения обобщения может служить утверждение о том, что наиболее точной будет та агент-ориентированная модель, в которой выделена каждая сущность предметной области. Согласно данному утверждению введем понятие «точность агент-ориентированной модели» (T). Модель является точной ($T = 1$), если она построена с выделением каждой сущности предметной области в отдельного агента.

Введем понятие «обобщенность», которое обозначает пропорцию между количественным составом обобщаемых субъектов и общим количеством субъектов:

$$O_N = \frac{1}{N},$$

где N – количество субъектов в обобщаемой группе.

Количественно точность можно определить на основании получаемых результатов моделирования. Пусть имеется набор $\{X^1\}$ результатов моделирования, полученных при $O = 1$, характеризующий точность $T^1 = 1$.

При $O = i$

$$T^i = 1 - \sqrt{\frac{(X_1^1 - X_1^i)^2 + \dots + (X_K^1 - X_K^i)^2}{K}},$$

где K – количество получаемых результатов моделирования; X_j^i – значение j -го результата моделирования при $O = i$.

По определению, значение точности функционально зависит от обобщенности:

$$T = f(O).$$

Введем понятие «уровень значимости точности модели» (ΔZ), которое будет характеризовать степень допустимой вероятной неточности результатов моделирования, т.е. допустимое значение отклонения T от 1. Для каждого типа элементов моделирования эмпирическим путем можно подобрать наилучшее значение данного критерия.

Таким образом, наиболее оптимальной является модель со значением функции обобщенности в точке $(T - \Delta Z)$:

$$f(O_N) = T - \Delta Z,$$

т.е. модель, содержащая N агентов.

Практическая реализация предложенного подхода возможна за счет использования экстенциональной модели.

Кроме того, интенциональная модель позволит выявить латентные знания о свойствах и поведении МПМ, существующих потенциально, а экстенциональная модель – получить новые знания, предоставляемые изменчивой действительностью. Далее производится уточнение как ИМ, так и ЭМ и выполняется новый цикл моделирования и получения знаний. Такой итерационный процесс следует продолжать до тех пор, пока не будет достигнуто состояние ЭМ, удовлетворяющее заданным критериям адекватности или качества функционирования.

Выводы

Создание агент-ориентированных моделей сложных систем требует адекватного воспроизводства структуры множества взаимодействующих элементов различной природы. Отсутствие единых подходов к процессу построения делает практически невозможным получение качественного конечного результата. Предложенная авторами методология позволяет рассматривать агент-ориентированное моделирование как единый многоуровневый итерационный процесс, обеспечивающий получение действующих моделей систем с различной степенью детализации действительности.

Литература

1. Аксенов К. А., Спицина И. А., Крохин А. Л. Сравнительный анализ методов разработки информационных систем на основе мультиагентного подхода // Компьютерный анализ изображений: Интеллектуальные решения в промышленных сетях (CAI-2016): сборник научных трудов. Екатеринбург: Учебно-методический центр Уральского политехнического института, 2016. С. 205–207.
2. Алфимцев А. Н., Локтев Д. А., Локтев А. А. Сравнение методологий разработки систем интеллектуального взаимодействия // Вестник Московского государственного строительного университета. 2013. № 5. С. 200–208.
3. Власова Н. А., Горохов А. В., Иванов К. И. Интеграция концептуальных и имитационных моделей для задач исследования социально-экономических систем // Наукоедение. 2014. № 6. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/76EVN614.pdf>. DOI: 10.15862/76EVN614
4. Зубарева М. Г., Цветков А. А., Хамуш А. Л., Шорох Д. К., Шуклин А. В., Юрсков С. В. Методологии проектирования мультиагентных систем // Технические науки в России и за рубежом. М.: Буки-Веди, 2016. С. 3–8.
5. Макаров В. Л., Бахтизин А. Р. Социальное моделирование – новый компьютерный прорыв (агент-ориентированные модели). М.: Экономика, 2013. 295 с.
6. Макаров В. Л., Бахтизин А. Р., Сушко Е. Д. Агент-ориентированные модели как инструмент апробации управленческих решений // Управленческое консультирование. 2016. № 12. С. 16–25.
7. Макаров В. Л., Бахтизин А. Р., Сушко Е. Д., Васенин В. А., Борисов В. А., Роганов В. А. Агент-ориентированные модели: мировой опыт и технические возможности реализации на суперкомпьютерах // Вестник Российской академии наук. 2016. Т. 86. № 3. С. 252–262.
8. Маковеев В. Н. Применение агент-ориентированных моделей в анализе и прогнозировании социально-экономического развития территорий // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. 2016. № 5 (47). С. 272–289.
9. Чекмарева Е. А. Концептуальная модель воспроизводства трудового потенциала на муниципальном уровне: агент-ориентированный подход // Социальное пространство. 2017. № 4 (11). URL: <http://sa.isert-ran.ru/article/2376>
10. Чекмарева Е. А. Обзор российского и зарубежного опыта агент-ориентированного моделирования сложных социально-экономических систем мезоуровня // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. 2016. № 2 (44). С. 225–246.
11. Швецов А. Н. Агентно-ориентированные системы: методологии проектирования. Вологда: Вологодский государственный университет, 2016. 192 с.
12. Швецов А. Н., Яковлев С. А. Распределенные интеллектуальные информационные системы. СПб.: Санкт-Петербургский электротехнический университет им. Ульянова (Ленина), 2003. 318 с.

References

1. Aksenov K. A., Spicina I. A., Krohin A. L. Sravnitel'nyj analiz metodov razrabotki informacionnykh sistem na osnove mul'tiagentnogo podhoda [Comparative analysis of methods for developing information systems based on a multi-agent approach]. *Komp'yuternyj analiz izobrazhenij: Intellektual'nye reshenija v promyshlennykh setjah (CAI-2016)* [Computer image analysis: Intelligent solutions in industrial networks (CAI-2016): a collection of scientific papers]. Ekaterinburg: The training and methodology center of Ural Polytechnic institute, 2016, pp. 205–207.
2. Alfimcev A. N., Loktev D. A., Loktev A. A. Sravnenie metodologij razrabotki sistem intellektual'nogo vzaimodejstvija [Comparison of methodologies for developing systems of intellectual interaction]. *Vestnik Moscovskogo gosudarstvennogo stroitel'nogo universiteta* [Vestnik of Moscow State Construction University], 2013, no. 5, pp. 200–208.

3. Vlasova N. A., Gorohov A. V., Ivanov K. I. Integracija konceptual'nyh i imitacionnyh modelej dlja zadach issledovanija social'no-jekonomicheskikh system [Integration of conceptual and simulation models for the tasks of research of socio-economic systems]. *Naukovedenie* [Sociology of science], 2014, no. 6. Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/76EVN614.pdf>. DOI: 10.15862/76EVN614.

4. Zubareva M. G., Cvetkov A. A., Hamush A. L., Shoroh D. K., Shuklin A. V., Jurskov S. V. Metodologii proektirovanija mul'tiagentnyh system [Methodologies for designing multi-agent systems]. *Tekhnicheskie nauki v Rossii i za rubezhom: materialy konferencii* [Technical sciences in Russia and abroad]. Moscow: Buki-Vedi, 2016, pp. 3–8.

5. Makarov V. L., Bahtizin A. R. *Social'noe modelirovanie – novyj komp'yuternyj proryv (agent-orientirovannye modeli)* [Social Modeling – New Computer Breakthrough (Agent-Based Models)]. Moscow: Jekonomika, 2013. 295 p.

6. Makarov V. L., Bahtizin A. R., Sushko E. D. Agent-orientirovannye modeli kak instrument aprobacii upravlencheskikh reshenij [Agent-based models as a tool for approving management decisions]. *Upravlencheskoe konsul'tirovanie* [Management Consulting], 2016, no. 12, pp. 16–25.

7. Makarov V. L., Bahtizin A. R., Sushko E. D., Vasenin V. A., Borisov V. A., Roganov V. A. Agent-orientirovannye modeli: mirovoj opyt i tehnicheckie vozmozhnosti realizacii na superkomp'yuterah [Agent-based models: global experience and technical capabilities of implementation on supercomputers]. *Vestnik Rossijskoj akademii nauk* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences], 2016, vol. 86, no. 3, pp. 252–262.

8. Makoveev V. N. Primenenie agent-orientirovannyh modelej v analize i prognozirovanii social'no-jekonomicheskogo razvitiya territorij [The use of agent-based models in the analysis and forecasting of socio-economic development of territories]. *Jekonomicheskie i social'nye peremeny: fakty, tendencii, prognoz* [Economic and social changes: facts, trends, forecast], 2016, no. 5 (47), pp. 272–289.

9. Chekmareva E. A. Konceptual'naja model' vosproizvodstva trudovogo potenciala na municipal'nom urovne: agent-orientirovannyj podhod [The conceptual model of the reproduction of labor potential at the municipal level: an agent-oriented approach]. *Social'noe prostranstvo* [Social space], 2017, no. 4 (11). Available at: <http://sa.isert-ran.ru/article/2376>

10. Chekmareva E. A. Obzor rossijskogo i zarubezhnogo opyta agent-orientirovannogo modelirovanija slozhnyh social'no-jekonomicheskikh sistem mezourovnja [Overview of Russian and foreign experience of agent-based modeling of complex socio-economic systems of the meso-level]. *Jekonomicheskie i social'nye peremeny: fakty, tendencii, prognoz* [Economic and social changes: facts, trends, forecast], 2016, no. 2 (44), pp. 225–246.

11. Shvecov A. N. *Agentno-orientirovannye sistemy: metodologii proektirovanija: monografija* [Agent-oriented systems: design methodologies: monograph]. Vologda: Vologda State University, 2016. 192 p.

12. Shvecov A. N., Jakovlev S. A. *Raspredelelennye intellektual'nye informacionnye sistemy* [Distributed Intelligent Information Systems]. St. Petersburg: Ul'yanov-Lenin St. Petersburg Electrotechnical University, 2003. 318 p.

Для цитирования: Швецов А. Н., Дианов С. В. Методика разработки агент-ориентированных моделей сложных систем // Вестник Череповецкого государственного университета. 2019. № 1 (88). С. 48–58. DOI: 10.23859/1994-0637-2019-1-88-5

For citation: Shvetsov A. N., Dianov S. V. Methodology of development of agent-oriented models of complex systems. *Bulletin of the Cherepovets State University*, 2019, no. 1 (88), pp. 48–58. DOI: 10.23859/1994-0637-2019-1-88-5