УДК 338.27

АГЕНТНО ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПОДХОД: НОВОЕ СРЕДСТВО ПОЛУЧЕНИЯ ЗНАНИЯ*

Р.В. ФАТТАХОВ,
доктор экономических наук, профессор,
директор Института региональных исследований
и проблем пространственного развития
Финансового университета
при Правительстве Российской Федерации
E-mail: fattakhov@mail.ru

М.Р. ФАТТАХОВ,
кандидат экономических наук,
научный сотрудник
E-mail: fatt_marat@rambler.ru
Центральный экономико-
математический институт РАН

Предмет/тема. *Статья рассматривает агентно ориентированный подход, позволяющий моделировать сложные системы, состояние которых меняется при возникновении взаимодействия между агентами.*

Цели/задачи. *Цели работы – подробный анализ, описание агентно ориентированного подхода, поддерживающего принцип моделирования «снизу вверх», а также рассмотрение таких понятий, как агент, среда и этапы проектирования модели.*

Данный подход нашел широкое применение в областях, охватывающих социальные, физические и биологические аспекты жизнедеятельности человека (авиация, медицина, военная промышленность, экология, анализ рынков, цепочки поставок, прогнозирование распространения эпидемий, решение транспортных задач и вопросов социальной сегрегации, развития городов, регионов и стран).

Методология. *В результате исследования дано системное описание агентно ориентированного подхода, проведен анализ прикладных аспектов программной реализации, рассмотрены принципы горизонтальной и иерархической организации моделей, показаны возможности использования суперкомпьютеров и сервисов облачных вычислений при масштабировании агентно ориентированных моделей, обозначены ограничения в использовании данного подхода и даны рекомендации по его применению. Дано описание сущности агента, его основных и дополнительных свойств и атрибутов, правил поведения и взаимодействия с другими агентами и со средой агентно ориентированной модели, а также среды модели и возможностей использования геоинформационных систем для ее создания. Рассмотрены возможности использования таких баз данных и систем, как CRM, ERP, HR, в качестве основы (исходных данных) для построения агентно ориентированных моделей.*

Выводы/значимость. *Сделан вывод о том, что данный подход является удобным инструментарием моделирования таких сложных объектов, как городские системы. Он позволит дополнить классические*

* Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского гуманитарного научного фонда (проект № 14-02-00362) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 14-06-31333).

методы моделирования и прогнозирования и получить новые знания.

Ключевые слова: *агентно ориентированная модель, многоагентная система, социальное моделирование, клеточный автомат, агент, среда, геоинформационная система, суперкомпьютер*

Агентно ориентированный подход был впервые применен в области информатики и кибернетики, в частности в исследовании искусственного интеллекта. Этот относительно новый подход активно начал использоваться с 1980-х гг. и получил широкое признание только в 1990-х гг. Последнее время многоагентные системы занимают все более важное место в таких областях исследований, как когнитивные и общественные науки (психология, этнология, социология, философия, экономика) и естественные науки.

Многоагентные системы (англ. multi-agent system или multi-agent simulation) – это системы, образованные несколькими взаимодействующими (интеллектуальными) компьютерными сущностями – агентами. Эти системы также известны как «самоорганизующиеся системы».

Агентно ориентированные модели (англ. agent-based models или agent-based modeling and simulation, далее – АОМ) также известны как агентно ориентированные системы (англ. agent-based systems или simulation), или индивидуально ориентированные модели (англ. individual-based modeling). АОМ позволяют моделировать сложные системы, состояние которых меняется ввиду возникновения взаимодействия между агентами (участниками системы), открывая новые возможности для изучения как теоретических, так и прикладных аспектов (процессов и явлений), протекающих в реальном мире. Некоторые ученые полагают, что АОМ – «это третий способ получения знания» наряду с дедуктивным и индуктивным подходами [17, с. 86; 10, с. 4].

Основная идея данного подхода как метода имитационного моделирования заключается в построении вычислительного инструмента, представляющего собой множество агентов с определенным набором свойств и правил поведения. Здесь заложен принцип моделирования «снизу вверх», т.е. деятельность независимых агентов на микроуровне влияет на показатели макроуровня. При этом простые правила, заложенные в модели, могут выдавать весьма интересные результаты и предсказывать появление сложных (глобальных) явлений. Это так называемый «эмерджентный феномен» – возникающее явление, возникающее событие. Данные результаты не могут быть получены путем изучения каждого отдельного агента системы. Хорошим примером этому может служить колония муравьев, создание и функционирование которой невозможно понять, изучая одного единственного муравья. Взаимодействие единиц модели приводит к нелинейности поведения всей системы в целом и может привести к разнообразному развитию системы. Аналогией этих процессов выступает игра в шахматы, где на доске в 64 клетки – достаточно простые правила игры, но сочетания различных ходов и взаимодействий фигур (взятие фигуры, рокировка) могут привести к огромному количеству различных партий.

Несмотря на уже довольно долгую историю использования АОМ, до сих пор не сформировалась устоявшаяся терминология данного подхода. Так, существует множество различных определений АОМ, но наиболее полным и лаконичным, по мнению авторов, является определение, данное А.Р. Бахтизиным в работе «Агентно ориентированные модели экономики» [2, с. 24].

Агентно ориентированные модели – специальный класс вычислимых моделей, основанных на индивидуальном поведении множества агентов и создаваемых для компьютерных симуляций. Они сочетает в себе элементы теории игр, сложных систем, вычислительной социологии, метода Монте-Карло и эволюционного программирования.

Агент и среда модели. Агентно ориентированное моделирование неразрывно связано с двумя понятиями – «агент» и «среда».

Не существует точного определения термина «агент» в АОМ, это является предметом широкой дискуссии, и, как правило, о нем просто договариваются. Агент – это интеллектуальная автономная компьютерная сущность, находящаяся в окружающей ее среде и взаимодействующая с другими подобными сущностями для достижения целей ее существования [22, с. 26–27].

В качестве агентов в АОМ выступают вирусы, животные, роботы, люди, инфраструктура, города, страны, а не только экономические агенты (домохозяйства, предприятия, государство и внешний мир) – субъекты экономических отношений, принимающие участие в производстве, распределении, обмене и потреблении экономических благ в классическом понимании. Неоднородность агентов является важным аспектом агентно ориентированного

подхода. Если в начале моделирования АОМ все агенты были одинаковыми, они могут измениться или эволюционировать с течением времени ввиду различного характера поведения, наличия или отсутствия определенных ресурсов, используемых методов принятия решений, получаемых данных в процессе существования, дальности горизонта видения, различных способностей к обучению и адаптации.

В качестве основных свойств и атрибутов агентов АОМ можно выделить:

1) автономию, при которой агенты функционируют самостоятельно и независимо друг от друга, что позволяет добиться разнообразия в поведении;
2) интеллектуальность, в соответствии с которой рациональный выбор в процессе принятия решений, хорошо описанный в теории, далеко не всегда применим на практике, и в особенности в агентно ориентированном подходе. Так, далеко не всегда в качестве оценки эффективности принятия решений в АОМ используется принцип оптимальности, максимизации полезности. Вместо того, чтобы представлять агентов в роли эгоистичных лиц, обладающих всей возможной информацией, в АОМ используется принцип ограниченной рациональности, выдвинутый еще Гербертом Саймоном;
3) репрезентативность, которая означает, что агент должен быть типичным представителем той совокупности, которую он представляет с определенным набором характеристик, правил поведения и методов принятия решений;
4) расположение во времени и пространстве – в «среде обитания», в соответствии с чем зачастую агент не «видит» всей среды, всего мира, а находится, перемещается и взаимодействует только в определенной ее части, т.е. агент обладает горизонтом виденья.

Агенты в АОМ часто имеют и дополнительные свойства, которые могут выступать как необходимые, так и необязательные в зависимости от задач моделирования. К таким свойствами относятся:

1) наличие жизненного цикла (агент рождается, размножается, умирает);
2) самостоятельность от разработчика модели или внешнего оператора;
3) взаимодействие – агенты в АОМ динамически не когерентны, т.е. их следующее состояние или действие не зависит только от предыдущего состояния, а зависит также и от текущего состояния его взаимодействия с другими агентами и окружающей средой, механизмами коммуникации, кооперации и обмена информацией. В данном случае агентно ориентированный подход объединяет в себе элементы искусственного интеллекта, искусственной жизни и теории игр;
4) целеустремленность – агент имеет ярко выраженную цель существования, которая управляет его поведением и оказывает существенное влияние на процесс принятия решений. Агенты АОМ с открытой целью (без цели существования) описываются как трекеры, а не как оптимизаторы или сущности, нацеленные на достижение определенных точек (целей). При этом функционирование агента не имеет естественной конечной точки, оно прекращается лишь со «смертью» самого агента;
5) восприятие мира – каждый агент на основе информации об окружающем его мире (среде) создает и изменяет свою внутреннюю концептуальную модель «образа мира». Она включает в себя представления о нормах и правилах, ролях и предписаниях, образцах поведения, состояниях других агентов и т.д. Концептуальная модель «образа мира» может быть неполной ввиду ограниченности восприятия или горизонта виденья агента, а в ряде случаев просто ошибочной. Агент может воспринимать себя путем анализа своей «биографии» – жизненного опыта. Это видение может меняться на разных этапах жизненного цикла агента, с течением времени;
6) способность обучаться, адаптироваться на основе своего опыта – индивидуальное обучение и адаптация требуют от агента наличия памяти, как правило, в виде динамического атрибута. Здесь также важно отличать индивидуальное обучение и адаптацию агента от общественного. Коллективное обучение и адаптация подразумевают наличие определенного атрибута, дающего данной группе агентов некое преимущество, которое растет с течением времени. Для моделирования процесса обучения ученые используют широкий спектр вычислительных средств. Они включают в себя теорию обучения с подкреплением (разработана профессором Гарвардского университета Б. Скиннером), нейронные сети, генетические алгоритмы, генетическое программирование и ряд других

алгоритмов, в которые входят элементы индуктивного обучения;

7) наличие ресурса – атрибуты, указывающие на текущий уровень запаса некого ресурса, например еды, энергии, богатства, информации и т.д. В зависимости от его наличия или отсутствия поведение агента может меняться.

При определении агентов в АОМ на *первом этапе* необходимо задать типы (классы) агентов и их атрибуты, при этом внутреннее состояние агентов могут представлять как дискретные, так и непрерывные данные. На *втором этапе* определяются правила поведения и взаимодействия. Они могут варьироваться от самых простых до очень сложных, состоящих из многоуровневых диаграмм состояний (англ. statechart) или нескольких тысяч строк программного кода. Это зависит:

- от объема информации, которую рассматривает агент:
- от того, какого рода решения он принимает;
- от того, насколько сложны механизмы взаимодействия, обучения и адаптации;
- от размера памяти, которую хранит и использует агент при принятии решений.

По мнению ряда авторов, «…для того, чтобы считать, что модель поддерживает агентно ориентированную парадигму, поведение агентов должно быть достаточно гибким» [17, с. 87].

Взаимодействие агентов между собой может принимать различные формы:

- коммуникация, когда агенты обмениваются между собой информацией при помощи специальных средств общения;
- кооперация, когда агенты взаимодействуют друг с другом, что позволяет им осуществлять совместную деятельность для достижения общих целей;
- управление, т.е. подчинительные отношения, когда один агент управляет поведением другого.

Форма и сила взаимодействия могут меняться в результате выбора агента, случайным образом или с течением времени. По территориальному охвату можно выделить несколько типов взаимодействия:

- глобальное, когда каждый агент может контактировать с любым другим агентом модели;
- групповое, когда агент взаимодействует с другими агентами, объединенными в общую сеть или находящимися в одном с ним районе;
- локальное, когда агент контактирует только с окружающими его агентами.

Стоит отметить, что при обмене информацией между агентами часть ее может быть скрыта. Сокрытие информации (состояние сдерживания) приводит к неопределенности во взаимоотношениях агентов, т.е. агент никогда не может быть полностью уверен, как будет вести себя другой агент. Даже если его действия протекают в соответствии с фиксированными методами ввиду индивидуализации своего поведения, он может по-разному реагировать на того или иного агента или менять свое поведение в зависимости от различного временного промежутка. Инструмент сокрытия информации позволяет АОМ добиться поразительного сходства с реальными явлениями и может применяться для описания самых сложных систем.

Среда – это пространство (совокупность объектов, ландшафта), окружающее совокупность агентов одного или нескольких видов, определяющее их условия функционирования и оказывающее на них прямое или косвенное воздействие.

Среда в АОМ представляет собой непрерывное пространство заданной формы, размера, с возможными состояниями, сферами влияния, определенными правилами динамического изменения и др. В ряде случаев среда может быть представлена как дискретная решетка (состоящая из квадратов, треугольников или шестиугольников) или как пассивная платформа для агентов, что существенно ограничивает потенциал модели. Зачастую в АОМ, где важен территориальный или географический аспект моделирования, в качестве среды выступают геоинформационные системы.

Геоинформационная система (ГИС) – это информационная система, предназначенная для сбора, хранения, анализа и графической визуализации пространственных данных и связанной с ними информации о представленных в ГИС объектах. ГИС включают в себя возможности систем управления базами данных (СУБД), редакторов растровой и векторной графики и аналитических средств и применяются в картографии, землеустройстве, экологии, муниципальном управлении, транспорте, экономике и многих других областях. По территориальному охвату различают глобальные, субконтинентальные, национальные, региональные и локальные ГИС. Данные в ГИС описывают такие реальные объекты, как дороги, здания, водоемы, лесные массивы. Эти объекты можно разделить на две абстрактные категории:

– дискретные (дома, районы, дороги);
– непрерывные (рельеф местности).

В геоинформационных системах используются два вида данных

– позиционные (географические) для определения местоположения объекта на земной поверхности;
– непозиционные – атрибутивные (описательные).

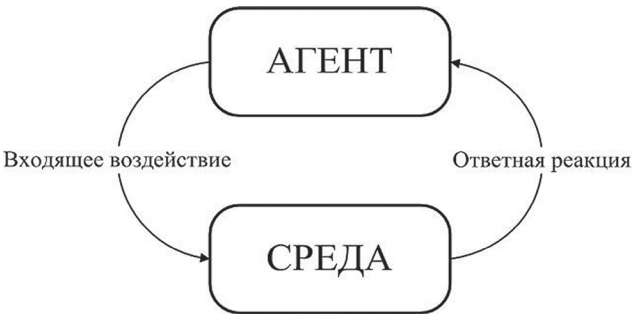
Упрощенная схема взаимодействия агентов и среды, где действия агентов оказывают влияние на среду, которая в свою очередь влияет на действия агентов посредством обратной связи, представлена на рис. 1. Как утверждает J.L. Casti [12], агент должен иметь как базовый уровень правил поведения, так и набор более высокого уровня «правил изменения правил», т.е. базовый уровень правил оказывает воздействие на среду, в то время как «правила изменения правил» обеспечивают адаптацию на ответную реакцию среды.

Агент учится на примерах, проводит анализ и логическую дедукцию при выявлении закономерностей окружающей среды, сохраняет полезную информацию, которая позволяет ему успешно функционировать в среде и изменять ее. При этом агенты в АОМ реагируют на среду сложным образом (не напрямую, а опосредованно; нелинейно; с запаздыванием и т.д.), варьируя свои действия и используя различные стратегии поведения. Агенты могут заранее жестко не планировать свои действия, а действовать в зависимости от ситуации.

Агентно ориентированный подход позволяет моделировать все три типа связей:

– агент – агент;
– агент – среда;
– среда – среда.

Степень сложности поведения агентов в среде и реакция среды на эти возмущения зависят от конкретной проблемы и конечной цели, стоящей перед разработчиком модели.



Источник: авторская разработка.

Рис. 1. Схема взаимодействия агентов модели со средой

В социальных и экономических науках АОМ открывает новые возможности для изучения самого широкого перечня вопросов, включая сложные явления, возникающие в процессе взаимодействия общества и социальной среды, которые зачастую в других подходах представлены как статичный пейзаж. В этом контексте можно выделить два основных направления развития АОМ в зависимости от целей исследования. Первая группа работ сосредоточена на изучении поведения агентов, т.е. на рассмотрении агентов в статичной среде. В основном это микромодели, основанные на «пешеходных» библиотеках, представляющие собой модели станций общественного транспорта, площадей городов, магазинов, мест массового скопления людей и др. Вторая группа работ сосредоточена на изучении пейзажа и процесса пространственного изменения среды. Использование АОМ для этого вида моделирования пришло из понимания того, что люди, принимая решения, оказывают сильное влияние на процессы пространственного развития и, как следствие, должны быть явно определены как часть структуры модели. Такого рода исследования охватывают многие проблемы развития городов, в том числе вопросы землепользования, территориального планирования и зонирования, а также другие аспекты, речь о которых пойдет далее.

Зарождение агентно ориентированного подхода. Идея агентно ориентированного моделирования была выдвинута еще в конце 1940-х гг. Но из-за высоких требований данного инструментария к вычислительным мощностям компьютеров он стал широко применяться лишь во время компьютерного бума 1990-х гг. АОМ можно рассматривать как естественное продолжение модели Э. Изинга [16, с. 253–258], работ Дж. Сакоды или машины фон Неймана. Фон Нейман пытался ответить на вопрос, может ли машина создать свою точную копию, т.е. способна ли она к размножению, самовоспроизведению? Эта концепция была усовершенствована математиком и другом Неймана Станиславом Уламом. С. Улам предложил построить такую машину на бумаге в виде набора сетки ячеек (клеток). Фон Нейману понравилась эта идея. Так была создана первая модель, известная нам как клеточный автомат.

Продолжение данный подход получил в известной модели – игре «Жизнь», разработанной

британским ученым Дж.Х. Конвеем. В отличие от машины фон Немана игрой «Жизнь» управляют чрезвычайно простые правила в виртуальном мире, похожем на двухмерную шахматную доску.

Одну из самых ранних АОМ можно проследить в работах Томаса Шеллинга, посвященных вопросам сегрегации [19, стр. 143–186]. Хотя вначале Т. Шеллинг использовал миллиметровую бумагу и монеты, а не компьютер, его модели воплотили в себе основные элементы концепции агентно ориентированных моделей. Автономно действующие агенты взаимодействовали в среде. И, как следствие, возникали различные результаты их деятельности.

В начале 1980-х гг. Роберт Аксельрод провел исследования в области теории игр. В том числе им была рассмотрена «дилемма заключенного» (англ. Prisoner's dilemma) с точки зрения агентно ориентированного подхода (стратегии и взаимодействия агентов модели). Дилемма заключенного – это фундаментальная проблема теории игр, согласно которой игроки не всегда будут сотрудничать друг с другом, даже если это в их интересах. Каждый игрок максимизирует свой собственный выигрыш, не заботясь о выгоде другого игрока. Эта дилемма была сформулирована еще 1950 г. М. Фладом и М. Дрешером.

В конце 1980-х гг. К. Рейнольдс разработал несколько моделей стадного или группового поведения животных. Они явились своего рода первыми моделями биологических социумов. В своих работах он пытался исследовать возникающее поведение в ходе моделирования коллективного (но не связанного) поведения реальных животных. Этот подход известен под названием «искусственная жизнь» (англ. Artificiallife). Данный термин был введен американским кибернетиком Кристофером Лэнгтоном в 1986 г.

Еще одна широко известная «сахарная» модель (англ. SugarScape) была предложена Джошуа Эпштейном и Робертом Акстеллом в середине 1990-х гг. Модель позволяла исследовать роль таких социальных явлений, как сезонная миграция, загрязнение окружающей среды, войны, рождение и смерть, распространение болезней.

Через год, в 1999 г. Найджел Гилберт выпустил первый учебник для специалистов в области социального моделирования, а также основал The Journal of Artificial Societies and Social Simulation[1].

Первый Всемирный конгресс по социальному моделированию (англ. WorldCongressonSocialSimulation) состоялся в 2006 г. в Киото (Япония), второй – в июле 2008 г. в северном пригороде Вирджинии (Вашингтон, округ Колумбия). Пятый конгресс прошел в Сан-Паулу (Бразилия) 4–7 ноября 2014 г.[2].

В России работы в области агентно ориентированного моделирования начались лишь в 2000-х гг. Так, в 2005 г. в Центральном экономико-математическом институте РАН под руководством академика В.Л. Макарова была разработана АОМ экономики России со встроенными нейронными сетями [3]. С 2010 г. в рамках Лаборатории искусственных обществ ЦЭМИ РАН ведутся разработки АОМ развития городов и территорий.

Этапы проектирования АОМ. Весь процесс анализа или прогнозирования с использованием АОМ можно отразить в виде совокупности взаимосвязанных и взаимообусловленных этапов по реализации общей цели исследования. Общий состав этапов и их взаимосвязь похожи на любую другую процедуру построения экономико-математической модели[1; 4; 5, с. 16–58; 6, с. 40]. Однако хотелось бы отметить специфические моменты, присущие именно агентно ориентированному подходу как средству имитационного моделирования.

Процесс моделирования с использованием агентно ориентированного подхода можно условно разделить на 3 стадии (рис. 2):

1) выявление проблемы и изучение объекта исследования;
2) спецификация, построение АОМ и анализ результатов ее работы;
3) системная эксплуатация модели.

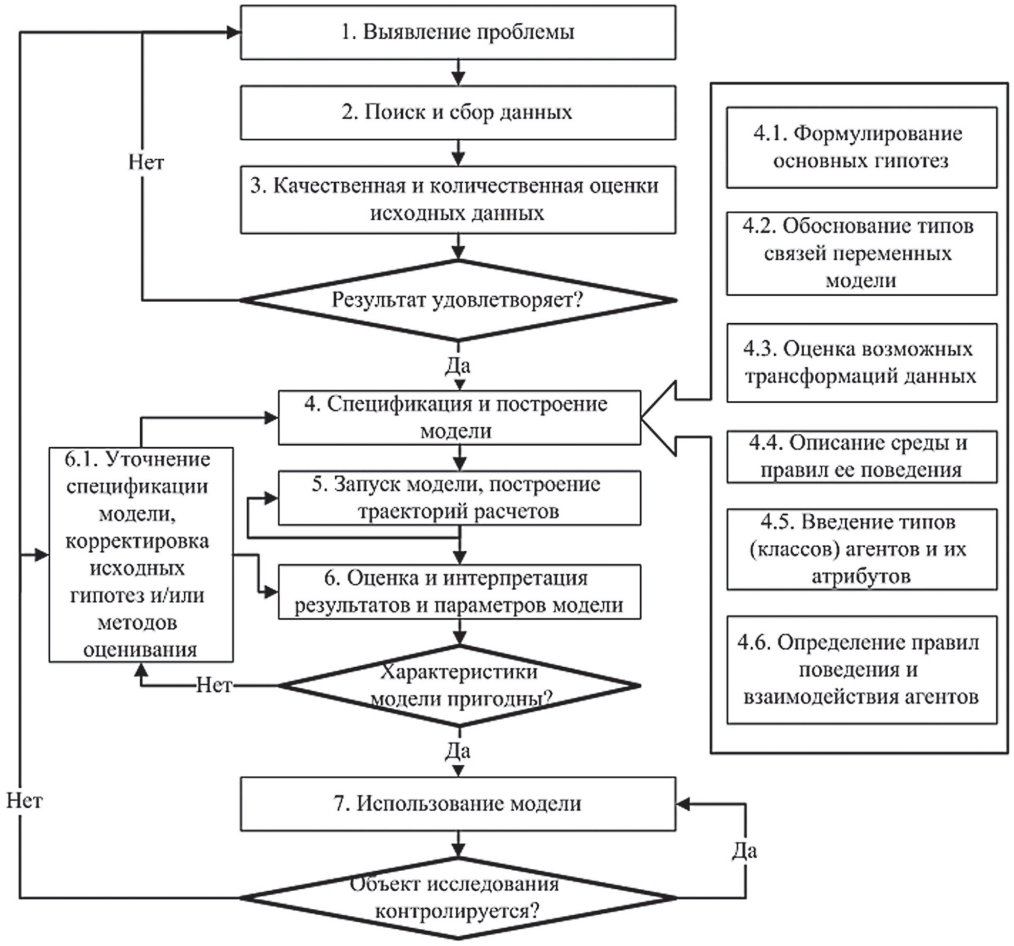
Первая стадия предполагает выявление необходимости в получении анализа или построении прогноза, установление целей и задач, определение характеристик и границ объекта исследования.

Вторая стадия предусматривает построение моделей любого вида, основой для которых является наличие:

– совокупности массива ретроспективной фактографической информации (статистических данных);
– экспертных суждений (аналитиков, корифеев в данной области знания);
– более ранних результатов и расчетов, полученных с использованием математического моделирования.

[1] URL: http://jasss.soc.surrey.ac.uk/.

[2] URL: http://www.wcss2014.pcs.usp.br/



Источник: авторская разработка.

Рис. 2. Основные этапы процедуры построения и использования АОМ

На третьей стадии в процессе моделирования АОМ подспорьем могут стать специальные базы данных и такие системы, как CRM-системы (Customer Relationship Management System, Система управления взаимоотношениями с клиентами), ERP-системы (Enterprise Resource Planning System, Система планирования ресурсов предприятия), HR (англ. Humanresources) и др.

CRM-система – это корпоративная информационная система, предназначенная для автоматизации стратегий взаимодействия с заказчиками компании. CRM-система позволяет повысить уровень продаж, оптимизировать маркетинг и улучшить обслуживание клиентов путем сохранения и анализа информации о них и истории взаимоотношений с ними.

ERP-система – это интегрированная система, созданная на базе информационных технологий для управления внутренними и внешними ресурсами предприятия (физическими активами, финансовыми, материально-техническими и человеческими ресурсами). ERP-система, построенная, как правило, на централизованной базе данных, формирует стандартизованное единое информационное пространство предприятия и объединяет в себе потоки информации между всеми хозяйственными подразделениями (бизнес-функциями) внутри предприятия, а также осуществляет информационную поддержку связей с другими предприятиями.

База данных человеческих ресурсов. Термин используется в экономике труда для описания баз данных людей, сотрудников компаний, граждан страны.

HR-система содержит широкий спектр информации, характеризующей и описывающей атрибуты, присущие реальному человеку. Человеческий ресурс – это относительно новый термин, появившийся в начале 1960-х гг. в североамериканских корпорациях, состоящих из большого числа сотрудников и практикующих принципы стратегического («научного») управления персоналом.

Агентно ориентированный подход естественным образом использует эти базы данных, позволяя применить их для решения задач моделирования. Например, в качестве атрибутов агентов могут использоваться данные из CRM-систем (если необходимо моделировать рынки) или из ERP/HR-систем (если необходимо моделировать динамику трудовых ресурсов в организации).

Главная задача этапа спецификации и построения АОМ – это понимание исследователями логики развития объекта изучения, введение среды, наполнение модели агентами, обозначение атрибутов,

правил обучения, адаптации и поведения агентов друг с другом и со средой.

В процессе построения агентно ориентированной модели предполагается многократный вычислительный эксперимент на одних и тех же данных. В связи с тем, что агентно ориентированная парадигма содержит элементы стохастики, разработчик получает набор траекторий расчета модели, по величине разброса которых можно судить о качественных характеристиках АОМ.

Если качество модели, а также расхождение между модельными и эмпирическими данными (как и степень соответствия результатов моделирования представлениям исходной статистики, гипотезам и теориям) не вызывают нареканий у разработчика, то данная модель приемлема для практического использования.

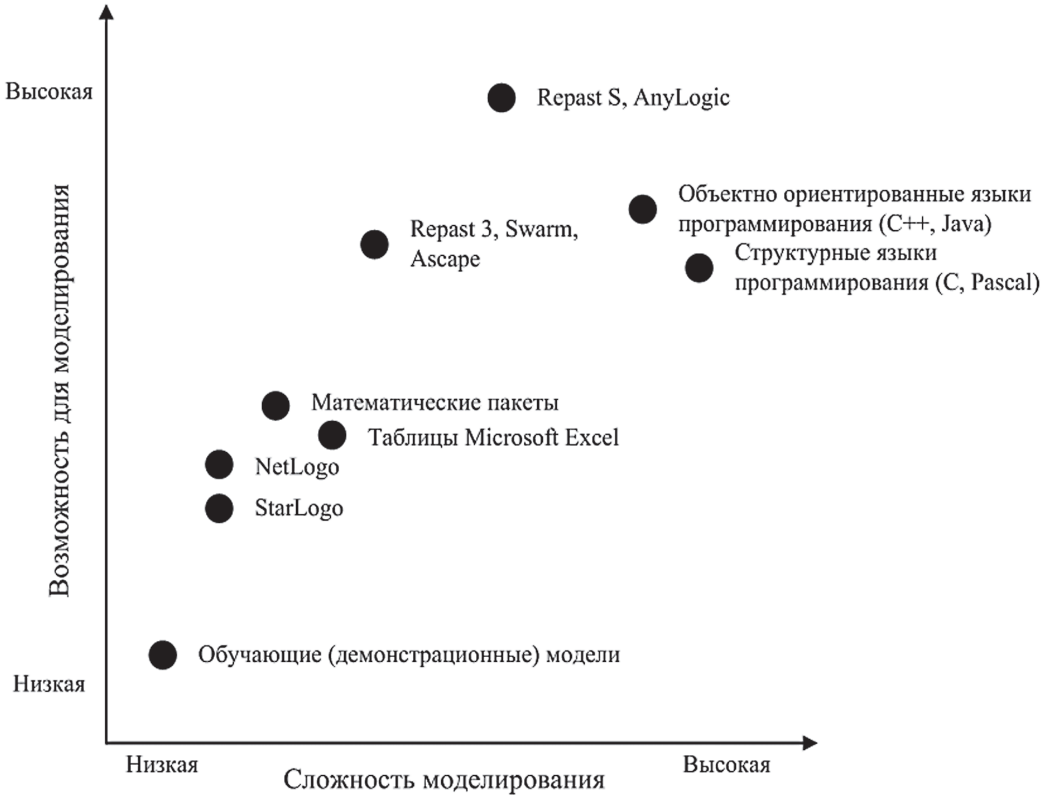
В процессе эксплуатации АОМ может неоднократно проходить процедуру подстройки (адаптации) или даже перестройку (реинженеринг) с течением времени в новых изменившихся условиях функционирования объекта исследования.

Программная реализация АОМ. Изучение сложных систем в значительной степени основано на использовании компьютерных симуляций в качестве виртуальных лабораторий. Разработка АОМ не требует использования специализированных программных продуктов. Для создания моделей можно использовать:

– такие общие языки программирования, как C++, Java, Delphi и др;
– такие математические инструментальные средства (генеральные вычислительные системы), как Mathematics, MATLAB или даже таблицы Microsoft Excel.

Однако использование специализированного программного обеспечения позволяет в значительной степени облегчить процесс разработки АОМ за счет набора готовых библиотек для представления агентов и среды. Двухмерная и с недавних пор уже доступная для ряда программ трехмерная визуализация, перемещение агентов в графическом пространстве – все это входит в стандартный набор специализированных программных сред. Однако использование данных платформ не всегда удобно для опытных пользователей, они могут ограничивать разработчика при проектировании сложных АОМ.

Сравнение различных подходов к построению АОМ по возможностям моделирования, которые предоставляют приведенные инструменты, и по трудозатратам на разработку модели представлено на рис. 3.



Источник: авторская разработка.

Рис. 3. Сравнение инструментария разработки АОМ

В настоящее время существует более 50 программных платформ, поддерживающих агентно ориентированную парадигму. Все они характеризуются своими плюсами и минусами, различными языками, на которых они были разработаны, возможностью поддержки FIPA (англ. Foundationfor Intelligent

Physical Agents), ГИС и 3D-графики. Остановимся на наиболее известных из них.

1. Первой АОМ-платформой была SWARM. Это универсальный прикладной продукт для моделирования параллельного распределения в виртуальном мире, разработанный в Институте Санта-Фе еще в 1994 г. SWARM представляет собой набор библиотек, написанных на языке программирования Objective-C, служащий основой для разработок сложных мультиагентных систем.
2. Следует отметить два программных продукта, разработанных японскими учеными (SOARS и ArtiSoc). SOARS был спроектирован в Токийском технологическом институте и состоит из 3 программных модулей (VisualShell, ModelBuilder и Animator). ArtiSoc является продуктом Токийского университета и позволяет быстро и легко реализовать агентно ориентированные модели. Принципы его работы были продемонстрированы на I Всемирном конгрессе по социальному моделированию, где с его помощью была построена известная модель сегрегации Шеллинга.
3. В Северо-Западном университете У. Виленским была создана NetLogo – простая и доступная программа для разработки АОМ, использующая модифицированную версию языка программирования Logo. NetLogo был разработан как учебный инструмент, однако сейчас им пользуются не только студенты, но и тысячи ученых и исследователей по всему миру. Схожей функциональностью обладает и другой программный продукт на данной платформе – StarLogo.
4. Repast представляет собой семейство передовых платформ с открытым исходным кодом, разработанных в Чикагском университете и предназначенных для построения АОМ. Это качественный продукт, работа над которым ведется уже на протяжении более чем 10 лет. Repast Simphony (RepastS) – последняя версия серии, предназначенная для визуального моделирования.
5. Продукт MASON, разработанный в Университете Джорджа Мейсона, включает в себя библиотеки Java, позволяет легко и быстро строить многоагентные модели.
6. Единственной в настоящее время профессиональной российской разработкой в области АОМ является программа AnyLogic. Java-ориентированная платформа, разработанная на Eclipse, предназначена для построения имитационных моделей и объединяет и комбинирует в себе 3 парадигмы (процессно ориентированного моделирования, системной динамики и агентно ориентированный подход). Данный продукт является коммерческой разработкой, благодаря чему он лишен многих недостатков, присущих программам, находящимся в свободном доступе.

Сравнение Java-язычных платформ можно найти в работах Тобиаса и Хоффмана, Николая и Мадейи.

Основные направления использования АОМ. В настоящее время АОМ применяются во многих областях, охватывающих социальные, физические и биологические аспекты жизнедеятельности человека. В частности, АОМ используются:

- для анализа новых рынков для продуктов, которые еще не были созданы;
- для моделирования поведения агентов на фондовом и потребительском рынках и цепочек поставок;
- для прогнозирования распространения эпидемий;
- для выработки мер по смягчению угроз и последствий биовойн;
- для объяснения законов распределения популярности политиков и процессов образования пробок на дорогах;
- для прогнозирования финансовых кризисов;
- для сохранения процессов социальной сегрегации, несмотря на повышающийся уровень толерантности в обществе;
- для выявления факторов, ставших причиной падений древних цивилизаций и т.д.

Также агентно ориентированные модели могут быть использованы для выявления так называемых точек бифуркации систем – момента времени, после которого происходит непрогнозируемый переход системы в другое состояние, что может привести к ее полному саморазрушению.

Приведем некоторые примеры использования агентно ориентированного подхода.

1. *Авиация.* АОМ, созданная для контроля и выполнения политики в области управления воздушным движением.
2. *Антропология.* А. Гриффин и Ч. Станиш разработали АОМ бассейна озера Титикака, находящегося на границе Перу и Боливии,

охватившую период с конца доисторического периода до средних веков (с 2 500 г. до н.э. – 1 000 г. н.э.). Модель использовалась для изучения развития цивилизации и политического строя. Она охватывала 50 тыс. км^2 в территориальном разрезе. Агентами модели выступали населенные пункты, люди, политические образования и руководители, которые взаимодействовали друг с другом и окружающим их миром (средой). Поведение агентов моделировалось как набор правил, влияющих на производство сельскохозяйственной продукции, миграцию, конкуренцию и торговлю. В результате ученые получили целый ряд альтернативных политических путей развития цивилизации данного региона, которые нашли свое подтверждения в археологических исследованиях. Также в археологии данный подход использовался для модели древних поселений, где среда была представлена двумя категориями – ресурсами и климатом.

3. *Биомедицинские исследования*. Примером является «Основной иммунный симулятор» – АОМ для изучения взаимодействия между врожденным и приобретенным иммунитетами. Кроме этого, создана модель поддержки принятия решений для врачей, лечащих больных раком.
4. *Химия*. Агентно ориентированная модель, посвященная моделированию молекулярной самоорганизации.
5. *Преступность*. Модель, использующая реальный город в роли среды обитания как законопослушных граждан, так и агентов-преступников.
6. *Экология*. Интересным примером иерархической АОМ из живой природы служит модель «хищник – жертва» К. Мока и Дж. Теста, в которой разработчики рассмотрели охоту касаток на исчезающие виды млекопитающих – морских львов и морских выдр на Аляске. Модель включает в себя как индивидуальный уровень поведения (процесс роста, размножения, смерти), так и групповой (состав группы может меняться из-за встречи с другими морскими млекопитающими). Данный подход смог с высокой точностью отобразить реальные процессы миграции видов млекопитающих, протекающие в территориальном разрезе (на Аляске). Широкое распространение агентно ориентированный подход получил и в области сохранения экологической целостности (экологических ценностей), восстановления и этического использования природных ресурсов.
7. *ТЭК*. АОМ для ТЭК позволяет производить расчеты различных сценариев развития офшорной ветроэнергетики. Кроме этого, разработана модель заправочных станций графства Западный Йоркшир (Великобритания). Целая серия работ ряда ученых в области исследования оптового рынка электроэнергетики Великобритании Л. Хонгрея и Л. Тасфатсона, П. Клемпера. Дж. Бовера и Д. Бонна, Д. Бонна и Ф. Оливейра, нацеленных на изучение возможных последствий от введения в 2001 г. новых правил торговли на рынке электроэнергии Соединенного Королевства (англ. International Electrical Testing Association, ранее National Electrical Testing Association).
8. *Военное направление*. В этой области АОМ помогают решить вопросы военного планирования и координации систем обороны.
9. *Моделирование эпидемий*. Например, масштабируемая мультиагентная модель, имитирующая жизнь города (контакты различного рода людей), отслеживающая бактериологический фон местности и места злонамеренного заражения людей. Кроме этого, создана серия работ Д. Эпштейна, посвященная вопросам эпидемий.
10. *Анализ рынков*. А. Харания вместе со своими коллегами разработали модель рынка суборбитального космического туризма. Каждый агент представлял собой лицо в космической отрасли в широком смысле слова: туристов, производителей кораблей, правительства и т.д., которые предоставляли или потребляли различные продукты и услуги. Туристические фирмы пытаются максимизировать прибыль, в то время как на рынке существует конкуренция, космические агентства устанавливают цену на запуск кораблей, туристы оценивают предлагаемые кампаниями услуги в зависимости от индивидуальных предпочтений. Л. Тасфатсон в своих работах исследовал рынок труда, а Т. Тассиар и Ф. Менкзер выявили факторы, оказывающие влияние на рынок труда США.
11. *Поддержка принятия решений*. Агентно ориентированный подход используется для выработки взаимовыгодных условий при ведении переговоров, например в области размещения крупных логистических центров.

12. *Городские исследования* [11, 13–15, 18, 20–21].
13. *Сельское хозяйство*. АОМ в этой сфере использовались для изучения новых методов ведения сельского хозяйства, и в частности фермерскими хозяйствами.
14. *Программное обеспечение и хранение информации*. В данной сфере АОМ используется для разработки и построения архитектуры программного обеспечения (англ. Agent-Oriented Software Engineering), применяемого, например, в корпоративных информационных системах. Агентно ориентированный подход позволяет существенно упростить процесс проектирования систем в области хранения и управления информацией.
15. *Финансовые рынки*. Можно отметить ряд работ, посвященных искусственному фондовому рынку, использованию при совершении сделок двойного аукциона. Примерами такого рода торгов могут служить «яма» Чикагской товарной биржи или фондовая биржа Нью-Йорка. Некоторые ранние АОМ финансовых рынков описаны в работах Б. Лебарона, В. Артура и его коллег, Н. Тайа и С. Линна, К. Идзумы и К. Уэда. Также в настоящее время агентно ориентированный подход используется для моделирования валютных рынков и управления инвестиционными портфелями [2].
16. *Описание методологии использовании АОМ для социальных наук* можно найти в работах Д. Эпштейна, в том числе посвященных эволюции социальных норм, Н. Гилберта, М. Мэйси и Р. Уиллера, Л. Тасфатсона и К. Джудда, Р. Аксельрода, которые также рассматривали вопрос становления и распада социальных норм как эволюционный процесс.

Другие примеры использования АОМ можно проследить, например, в торговых сетях, онлайн-торговле (такие интернет-аукционы, как eBay), анализе последствий стихийных бедствий, в компьютерной графике, используемой для кинофильмов, в решении транспортных задач и задач логистики, в области сетевых и мобильных технологий для автоматизации динамической балансировки нагрузки сети, масштабирования и самовосстановления сети. Эти и другие примеры представлены на сайте Л. Тасфатсона или в работах Ч. Микеля и М. Норса.

Так, благодаря относительной простоте отображения агентов в социальных системах и их естественной иерархической самоорганизации, Л. Тасфатсон и Р. Аксельрод считают именно решение задач социологии и экономики приоритетным направлением использования агентно ориентированного подхода. Социальные науки стремятся понять, не только как ведут себя люди, но и как они взаимодействуют между собой и окружающим их миром, как эти пространственные взаимодействия приводят к глобальным изменениям системы. При этом зачастую результатом их деятельности становится синергетический эффект, изучение которого представляет особый интерес для ученых.

В социальных науках АОМ также связано с понятием искусственного общества. Академик РАН В.Л. Макаров сформулировал следующее определение: искусственное общество – это совокупность взаимодействующих агентов в АОМ.

Горизонтальная и иерархическая организация АОМ, интерактивные АОМ. Разработанная изначально для использования на одном компьютере с небольшим числом взаимодействующих агентов, АОМ позволяет облегчить верификацию и отладку модели и в дальнейшем может быть расширена. Для увеличения числа агентов модели можно использовать распределение вычислений между несколькими компьютерами в сети с использованием дополнительной памяти и процессорных ядер или использовать суперкомпьютеры, предназначенные для ускорения расчетов модели.

Облачные вычисления (англ. cloudcomputing) – это технология распределенной обработки данных, в которой компьютерные ресурсы и мощности предоставляются пользователю как интернет-сервис. Данный подход широко используется Стэндфордским университетом уже с начала 2000 г. Например, при разработке проекта Folding@home, направленного на изучение свертываемости молекул белка, его производительность к апрелю 2011 г. превысила 7 петафлопс. Помимо центральных процессоров компьютеров обычных пользователей для этих целей были задействованы и графические процессоры (AMD/ATI, NVIDIA). Особенность данных платформ заключается в том, что в графическом процессоре выполняется множество потоков, благодаря чему достигается многократное превосходство в скорости расчетов над самыми современными CPUотIntelи AMD (зачастую превосходство в мощности над процессорами общего назначения составляет 150 раз). Для этих целей также используются игровые консоли PlayStation от Sony с многопоточными (многоядерными) процес-

сорами, что дает им преимущества перед обычными CPU, которые редко имеют 12 ядер. Так, например, теоретическая мощность PlayStation 3 составляет около двух трлн операций с плавающей точкой в секунду (2 терафлопс).

Агентно ориентированный подход поддерживает и облегчает процесс моделирования иерархических структур. Агенты в АОМ могут включать в себя агентов более низкого уровня (домохозяйства могут включать в себя членов семьи, общины – несколько домохозяйств, в свою очередь, страна может состоять из общин). Агенты низшего уровня могут взаимодействовать не только друг с другом, но и с агентом высшего уровня, частью которого они являются. Так, агентно ориентированные модели позволяют моделировать системы с вложенными самоорганизующимися подсистемами как часто встречающимися в реальном мире.

С течением времени организационная структура компаний постоянно меняется для сохранения конкурентоспособных позиций на рынке. Поэтому использование классических методов для представления деятельности организации становится невозможно. В то же время в АОМ компания может быть представлена как агент, состоящий из агентов более низкого уровня (работников, менеджеров, руководителей). При этом горизонтальный размер и иерархическая структура этих агентов могут развиваться естественным образом с течением времени путем найма и увольнения сотрудников, проведения реорганизации компании. Хорошим примером такого динамического инновационного развития и поддержания конкурентоспособности компании на рынке служит компания Google, описанная Л. Тасфатсоном.

Способность АОМ к гибкому моделированию сложных систем в горизонтальном и вертикальном разрезах является неоспоримым преимуществом перед классическими методами моделирования сложных систем.

Обычно после введения всех начальных данных, условий и правил поведения АОМ становится закрытой моделью по отношению к внешнему миру. Однако при помощи общих типов ввода-вывода потоков данных АОМ может поддерживать взаимодействие между компьютером и реальным моделируемым объектом в режиме реального времени. При этом АОМ управляется при помощи данных, поступающих в нее из внешней среды. Такое управление является одной из форм интерактивной системы, известной как супермашина Тьюринга. В данном случае модель выступает в качестве интерактивной системы – инструмента поддержки принятия решений. Возможность построения АОМ как открытой системы, взаимодействующей с внешней средой и обменивающейся с ней потоками информации, является интересным и перспективным с прикладной точки зрения направлением.

Итак, почему же агентно ориентированное моделирование становится все более популярным? Ответом на этот вопрос может быть: «потому что мы живем во все более сложном мире»[17, с. 87].

Во-первых, анализ и моделирование систем становятся все более сложными задачами с точки зрения большого количества прямых и обратных связей, выявление которых зачастую не представляется возможным [7, 8, 9]. Классические подходы к моделированию уже не могут быть применены. Примером невозможности дальнейшего использования традиционных методов моделирования может служить децентрализированный рынок энергетики Соединенного Королевства, в котором агенты (компании) теперь свободны в вопросах ценообразования и инвестиционной политики, они могут принимать решения о развитии на основании собственных индивидуальных критериев.

Во-вторых, некоторые системы на протяжении всего времени их моделирования были слишком сложны для построения адекватной модели. Так, построение моделей экономических рынков традиционно опирались на некоторые допущения. Вводилось понятие совершенного рынка, однородных агентов, долгосрочного равновесия и т.д. АОМ позволило в процессе разработки модели отойти от использования многих допущений и предположений, что позволило получить более реалистичный взгляд на моделируемые системы (объекты) за счет механизма прозрачного описания сложных систем, более низкого уровня агрегации и использования в модели только реальных ретроспективных агентов.

В-третьих, в настоящее время данные собираются на более низком уровне абстракции, что позволяет использовать их в процессе создания агентно ориентированных моделей.

В-четвертых, развитие, например, такого нового объекта исследования, как социальные сети, требует использования такого нового инструментария, как АОМ.

Последний и, наверное, самый главный фактор, повлиявший на распространение АОМ во всех об-

ластях науки, – это бурное развитие компьютерной техники и, как следствие, рост вычислительных мощностей. Теперь ученые могут вычислять крупномасштабные модели, в которых находятся тысячи и даже миллионы агентов, что еще несколько лет назад было просто невозможно.

Применение АОМ дает преимущество перед традиционными подходами моделирования, когда:

- в задаче много агентов и они взаимодействуют неслучайным образом (например, социальные сети);
- важно отразить в модели истинное поведение агентов (их сложные взаимодействия, координацию, переговоры и обмен информацией);
- в реальном мире взаимодействие агентов между собой или агентов со средой приводит к изменению системы в целом (другими словами, когда флуктуации на микроуровне оказывают серьезное воздействие на макроуровне);
- важно, чтобы агент адаптировался и изменял свое поведение;
- необходимо учесть возможность обучения агента;
- необходимо учесть иерархичность процессов (взаимодействие агентов внутри более крупного агента);
- необходимо учесть пространственную компоненту поведения элементов системы;
- прошлое не предсказывает будущее, т.е. необходимо отказаться от трендового прогноза;
- проводится моделирование на более низком уровне агрегации, необходимо отказаться от оперирования усредненными показателями (средние темпы роста, средний душевой доход и т.д.);
- процесс структурных изменений системы должен быть эндогенным результатом работы модели и др.

Теперь хотелось бы более подробно остановиться на вопросе отличия АОМ от клеточного автомата (КА). За последнее десятилетие было создано множество моделей, объединивших в себе принципы и методы двух этих инструментов моделирования. Однако необходимо выделить принципиальные отличия АОМ от КА:

- непрерывность во времени и пространстве;
- асинхронность поведения агентов модели;
- возможность изменения правил поведения в процессе работы модели вследствие процессов обучения и адаптации агентов;
- более сложные и разнообразные правила принятия решения в АОМ по сравнению с правилами перехода в КА;
- высокая степень гибкости АОМ, позволяющая исследовать неоднородность модели и сложные взаимосвязи, протекающие в ней;
- агентно ориентированная парадигма поддерживает все виды связей (агент – агент, агент – среда, среда – среда); в то время как в КА возможен лишь вид связи среда – среда, реализованный через фиксированные правила перехода.

Стоит отметить, что использование АОМ не всегда необходимо, а иногда может только усложнить процесс моделирования. Например, если предмет исследования может быть описан четкими линейными связями или он представлен одним большим или малым числом агентов, которые взаимодействуют случайным образом. Нежелательно также создание очень сложных АОМ с множеством мелких деталей, что может затруднить процесс анализа и понимания результатов моделирования.

Агентно ориентированный подход в моделировании социально-экономических явлений позволяет явным образом моделировать индивидуальное поведение и взаимодействие агентов модели. Таким образом, АОМ является удобным инструментарием моделирования таких сложных объектов, например, как городские системы. При этом современные компьютерные технологии должны стать серьезным подспорьем в процессе разработки и эксплуатации данных моделей.

Список литературы

1. *Айвазян С.А., Мхитарян В.С.* Прикладная статистика и основы эконометрики. М.: ЮнитиДана, 2001. Т. 2. 656 с.

2. *Бахтизин А.Р.* Агентно ориентированные модели экономики. М.: Экономика, 2008. 279 с.

3. *Макаров В.Л., Бахтизин А.Р. и Бахтизина Н.В.* CGE-модель социально-экономической системы России со встроенными нейронными сетями. М.: ЦЭМИ РАН, 2005. 152 с.

4. *Орешников В.В., Низамутдинов М.М.* Разработка стратегий развития муниципальных образований на основе имитационного моделирования // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. 2011. № 5. С. 138–146.

5. *Писарева О.М.* Методы прогнозирования развития социально-экономических систем. М.: Высшая школа, 2007. 591 с.

6. *Фатхутдинова Л.Р.* Прогнозирование развития экономической системы с использованием адаптивных моделей // Человек. Сообщество. Управление. 2012. № 5. С. 49–55.

7. *Юсупова Н.И., Шахмаметова Г.Р., Еникеева К.Р*. Интеллектуальная информационная поддержка процесса анализа риска опасных производственных объектов нефтяной отрасли // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2011. № 1. С. 173–179.

8. *Юсупова Н.И., Митакович С.А., Еникеева К.Р.* Системное моделирование процесса информационной поддержки разработки паспортов безопасности опасных производственных объектов // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2008. Т. 10. № 2. С. 80–87.

9. *Юсупова Н.И., Шахмаметова Г.Р., Еникеева К.Р*. Модели представления знаний для идентификации опасностей промышленного объекта // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2008. Т. 11. № 1. С. 91–100.

10. *Axelrod R., Tesfatsion L.* A guide for new comers to agent-based modeling in the social sciences: Agent-Based Computational Economics: Handbook of Computational Economics. Amsterdam, Netherlands: North-Holland, 2005. 904 p.

11. *Batty M.* Cities and Complexity: Understanding Cities with Cellular Automata, Agent-Based Models, and Fractals. Cambridge, MA: MIT Press, 2007. 592 p.

12. *Casti J.L.* Would-Be Worlds: How Simulation Is Changing the Frontiers of Science. New York: Wiley, 1997. 264 p.

13. *Ferber J.* Multi-Agent Systems: An Introduction to Distributed Artificial Intelligence. Harlow: Addison-Wesley, 1999. 528 p.

14. *Gilbert G.N., Conte R*. Artificial societies: the computer simulation of social life. London: UCL Press, 1995. 257 p.

15. *Gilbert N.S., Troitzsch K.G*. Simulation for the Social Scientist. Buckingham: Open University Press, 1999. 312 p.

16. *Ising E*. Beitrag zur Theorie des Ferromagnetismus. Zeitschrift für Physik, 1925. T. 31. P. 253–258.

17. *Macal C.M., North M.J*. Agent-based modeling and simulation. Piscataway, New Jersey: Institute of Electrical and Electronic Engineers, 2009. Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference. P. 86–98.

18. *Portugali J.* Self-Organization and the City. Springer New York, 2000. P. 7953–7991. Doi 10.1007 / 978-0-387-30440-3_471.

19. *Schelling T.C.* Dynamic Models of Segregation // Journal of Mathematical Sociology. 1971. Vol. 1. P. 143–186.

20. *Turok I., Mykhnenko V*. The Trajectories of European Cities, 1960–2005. Cities, 2007. Doi: 10.1016/j.cities.2007.01.007.

21. *White R., Engelen G*. Cellular Automata and Fractal Urban Form: A Cellular Modelling Approach to the Evolution of Urban Land Use Patterns. Environment and Planning A, 1993. Vol. 25. P. 1175–1199.

22. *Wooldridge M.J.* Agent-based software engineering. IEE Proceedings-software, 1997. Vol. 144. № 1. P. 26–37.

Regional Economics: Theory and Practice
ISSN 2311-8733 (Online)
ISSN 2073-1477 (Print)

Theory of Regional Economy

AGENT-ORIENTED APPROACH AS A NEW WAY OF OBTAINING KNOWLEDGE

Rafael' V. FATTAKHOV,
Marat R. FATTAKHOV

Abstract

Importance We all live in a complex, ever-changing world. To model the socio-economic and spatial processes and phenomena in the high level of detail using traditional approaches is becoming increasingly difficult. Due to the rapid development of computer technology, an agent-based approach has come into service in the classical methods and modeling tools. This approach allows to model complex systems, the state of which changes since the emergence of interaction between agents.

Objectives The purpose of this paper is to analyze in detail and describe new tools to build complex systems, i.e. an agent-based approach supporting the principle of modeling "bottom-up", the activities of independent agents at the microlevel and the performance at the macrolevel, and to consider in detail such concepts as an agent, environment model, and stages of model design.

Methods This approach is widely used in many areas covering social, physical and biological aspects of human life: aviation, medicine, the military direction, ecology, market analysis, supply chain, forecasting the spread of epidemics, the solution of transport problems, issues of social segregation, urban, regional, and countries' development, as well as in many other areas. The article describes the essence of the agent, its basic and additional properties and attributes, rules of behavior and interaction with other agents and with the agent-based model's environment. As well, the article describes the model's environment and the possibilities of using GIS to create it. The paper considers the possibility of using specific databases and systems, such as CRM-system, ERP-systems, and HR as a base for building agent-based models.

Results The study gives a system description of the agent-based approach; it analyzes the applied aspects of program implementation, considers the principles of horizontal and hierarchical organization of models, shows the possibilities of use of supercomputers and cloud computing services when scaling agent-based models, identifies limitations of this approach, and gives recommendations on its applications.

Conclusions and Relevance The authors conclude that this approach is a useful tool to simulate complex objects, such as urban systems. It can complement the classical methods of modeling and forecasting, allowing acquiring new knowledge.

Keywords: agent-based model, multi-agent system, social modeling, cellular automaton, agent, habitat, Geographic Information System, supercomputer

References

1. Aivazyan S.A., Mkhitaryan V.S. *Prikladnaya statistika i osnovy ekonometriki* [Applied statistics and fundamentals of econometrics]. Moscow, YUNITI-DANA Publ., 2001, vol. 2, 656 p.

2. Bakhtizin A.R. *Agentno orientirovannye modeli ekonomiki* [The agent-based models of economy]. Moscow, Ekonomika Publ., 2008, 279 p.

3. Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Bakhtizina N.V. *CGE-model' sotsial'no-ekonomicheskoi sistemy Rossii so vstroennymi neironnymi setyami* [A CGE model of social and economic system of Russia with the built-in neural networks]. Moscow, Central Economics and Mathematics Institute of Russian Academy of Sciences Publ., 2005, 152 p.

4. Oreshnikov V.V., Nizamutdinov M.M. Razrabotka strategii razvitiya munitsipal'nykh obrazovanii na osnove imitatsionnogo modelirovaniya [Development of strategies of municipalities on the basis of simulation modeling]. *Ekonomicheskie i sotsial'nye peremeny: fakty, tendentsii, prognoz = Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast*, 2011, no. 5, pp. 138–146.

5. Pisareva O.M. *Metody prognozirovaniya razvitiya sotsial'no-ekonomicheskikh sistem* [Methods of forecasting the development of social and economic systems]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2007, 591 p.

6. Fatkhutdinova L.R. Prognozirovanie razvitiya ekonomicheskoi sistemy s ispol'zovaniem adaptivnykh modelei [Forecasting the development of an economic system with the use of adaptive models]. *Chelovek. Soobshchestvo. Upravlenie = Human. Community. Management*, 2012, no. 5, pp. 49–55.

7. Yusupova N.I., Shakhmametova G.R., Enikeeva K.R. Intellektual'naya informatsionnaya podderzhka protsessa analiza riska opasnykh proizvodstvennykh ob"ektov neftyanoi otrasli [Intelligent information supporting for risk analysis of the oil sector's dangerous industrial objects]. *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefti i nefteproduktov = Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products*, 2011, no. 1, pp. 173–179.

8. Yusupova N.I., Mitakovich S.A., Enikeeva K.R. Sistemnoe modelirovanie protsessa informatsionnoi podderzhki razrabotki pasportov bezopasnosti opasnykh proizvodstvennykh ob"ektov [System modeling of process of information support of development of material safety of data sheets of hazardous production facilities]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik UGATU*, 2008, vol. 10, no. 2, pp. 80–87.

9. Yusupova N.I., Shakhmametova G.R., Enikeeva K.R. Modeli predstavleniya znanii dlya identifikatsii opasnostei promyshlennogo ob"ekta [Knowledge representation models for identification of dangers of industrial objects]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik UGATU*, 2008, vol. 11, no. 1, pp. 91–100.

10. Axelrod R., Tesfatsion L. A guide for new comers to agent-based modeling in the social sciences: Agent-Based Computational Economics: Handbook of Computational Economics. Amsterdam, Netherlands, North-Holland, 2005, 904 p.

11. Batty M. Cities and Complexity: Understanding Cities with Cellular Automata, Agent-Based Models and Fractals. Cambridge, MA, MIT Press, 2007, 592 p.

12. Casti J.L. Would-Be Worlds: How Simulation Is Changing the Frontiers of Science. New York, Wiley, 1997, 264 p.

13. Ferber J. Multi-Agent Systems: An Introduction to Distributed Artificial Intelligence. Harlow, Addison-Wesley, 1999, 528 p.

14. Gilbert G.N., Conte R. Artificial Societies: The Computer Simulation of Social Life. London, UCL Press, 1995, 257 p.

15. Gilbert N.S., Troitzsch K.G. Simulation for the Social Scientist. Buckingham, Open University Press, 1999, 312 p.

16. Ising E. Beitrag zur Theorie des Ferromagnetismus. Zeitschrift für Physik. 1925, vol. 31, pp. 253–258.

17. Macal C.M., North M.J. Agent-based Modeling and Simulation. Piscataway, New Jersey, Institute of Electrical and Electronic Engineers, 2009. Proceedings of the Winter Simulation Conference, 2009, pp. 86–98.

18. Portugali J. Self-Organization and the City. New York, Springer, 2000, pp. 7953–7991. Doi 10.1007 / 978-0-387-30440-3_471.

19. Schelling T.C. Dynamic Models of Segregation. *Journal of Mathematical Sociology*, 1971, vol. 1, pp. 143–186.

20. Turok I., Mykhnenko V. The Trajectories of European Cities, 1960–2005. Cities, 2007. Doi: 10.1016/j.cities.2007.01.007.

21. White R., Engelen G. Cellular Automata and Fractal Urban Form: A Cellular Modelling Approach to the Evolution of Urban Land Use Patterns. *Environment and Planning A*, 1993, vol. 25, pp. 1175–1199.

22. Wooldridge M.J. Agent-based software engineering. *IEE Proceedings-software*, 1997, vol. 144, no. 1, pp. 26–37.

Rafael' V. FATTAKHOV
Institute for Regional Research and Spatial Development of Financial University under Government of Russian Federation, Moscow, Russian Federation
fattakhov@mail.ru

Marat R. FATTAKHOV
Central Economics and Mathematics Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
fatt_marat@rambler.ru

Acknowledgments

The study was supported by the Russian Foundation for Humanities, project No. 14-02-00362, and the Russian Foundation for Basic Research, project No. 14-06-31333.