

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕЖДУ МУНИЦИПАЛИТЕТАМИ, РЕГИОНАМИ, ОРГАНАМИ ГОСУДАРСТВЕННОГО УПРАВЛЕНИЯ¹

В.Л. Макаров, А.Р. Бахтизин, Е.Д. Сушко

Дан обзор современных мультиагентных систем, разработанных для анализа типичных проблем территориальных образований. Представлена мультиагентная модель муниципальных образований в составе региона, в которой агентами являются люди и организации, в которых они работают. Основное внимание уделено обеспечению реалистичности имитации поведения таких агентов в качестве участников производства, а также взаимозависимости поведения и состояний агентов разных типов и изменений внешней среды. Приведен пример использования модели для апробации различных вариантов вертикальных межбюджетных отношений.

Ключевые слова: агент-ориентированное моделирование, апробация региональной политики, поведение человека в социально-экономической среде, трудовой потенциал.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших управленческих задач, стоящих перед властями разного уровня — как перед местными властями на уровне муниципальных образований, так и перед региональными на уровне субъектов Российской Федерации, а также перед федеральными органами государственного управления, — является задача разработки планов территориального развития. Для того чтобы подобные планы были реализованы и принесли ожидаемые экономические и социальные эффекты, каждый такой план должен быть не только тщательно подготовлен, выверен по срокам и ресурсам, но и согласован с планами соседей на одном уровне иерархии и планами субъектов других уровней. А кроме того, при планировании реализации тех или иных проектов, особенно крупных, необходимо проанализировать, как поведет себя объект

управления при возможных изменениях внешней среды, особенно неблагоприятных, и какие из этих изменений являются для реализации проекта критичными. Именно с целью получения качественных прогнозов параметров управляемой социально-экономической системы в зависимости от принимаемых мер, а также оценок динамики этих параметров при возможных изменениях внешней среды, разработчики различных территориальных планов все чаще обращаются к такому инструменту, как имитационное моделирование. Очевидно, что для правомерности применения компьютерной модели в процессе территориального управления необходимо, чтобы она, как минимум:

- обеспечивала максимально возможное приближение к реальности, с тем, чтобы позволять распространять выводы, полученные в результате компьютерных экспериментов, на существующий в действительности объект моделирования;
- обладала развитым и удобным интерфейсом, обеспечивающим пользователя наглядным представлением процессов, происходящих в модели (с обязательной привязкой их к карте территории моделируемого объекта), а также возможностью управлять этими процессами.

¹ Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Роль пространства в модернизации России: природный и социально-экономический потенциал».

Главная отличительная особенность таких крупных территориальных объектов, как муниципальные образования, а тем более субъекты РФ, в состав которых они входят, состоит в том, что они представляют собой большие системы со сложной иерархией разного рода включенных в них самостоятельных акторов, таких, например, как жители региона или же предприятия на его территории, т. е. являются активными системами [1]. Самостоятельность акторов означает, что они обладают некоторыми ресурсами (возможностями), миссией и соответствующими критериями ее выполнения, а также способностью принимать какие-то решения, реализация которых отражается на результатах их деятельности. Причем, даже акторы одного уровня (например, предприятия) могут существенно различаться между собой характеристиками, значимыми в смысле их участия в экономической жизни территорий.

Для имитации поведения сложных социально-экономических систем наиболее адекватным инструментом представляются активно развивающиеся в последнее время агент-ориентированные (мультиагентные) модели (АОМ) [2, 3]. Появление АОМ можно рассматривать как результат эволюции методологии моделирования: переход от моно-моделей (одна модель — один алгоритм) к мульти-моделям (одна модель — множество независимых алгоритмов). Мультиагентные модели способны имитировать поведение больших систем на основе реконструкции их внутренней структуры, а также структуры и поведения включенных в них более мелких экономических акторов, демонстрируя динамику социально-экономических характеристик этих систем как результат действия данных самостоятельных акторов. От объектно-ориентированных моделей АОМ отличаются «активностью» своих элементов, каждый из которых обладает не только заданным набором личностных характеристик («ресурсов»), но и целевой функцией («интересами»), на основе чего имитируется его реакция на изменения внешней среды, затрагивающие сферу его интересов («поведение»). Таким образом, АОМ представляет собой искусственное общество, состоящее из взаимодействующих между собой самостоятельных агентов, причем важная особенность мультиагентных моделей заключается в том, что конкретные значения характеристик агентов различаются, поэтому полученное сообщество состоит из похожих, но не одинаковых членов. А возможности современных вычислительных средств позволяют создавать искусственные сообщества, количество агентов которого сопоставимо с численностью членов реального моделируемого общества.

Современные вычислительные средства предоставляют также и другие возможности, которые могут быть востребованы при создании инструментов имитационного моделирования территориальных образований, — в первую очередь это относится к геоинформационным системам (ГИС). По своей сути ГИС — это системы, позволяющие создавать базы данных, которые сочетают в себе графическое и атрибутивное представления разнородной информации. Кроме того, эти системы обеспечивают возможность пространственного анализа данных и представление его результатов в привычной для пользователей форме (в виде графиков, диаграмм, таблиц, карт и т. п.). Сочетание мультиагентного подхода с возможностями ГИС позволяет обеспечить не только правдоподобную имитацию процессов, происходящих в реальном моделируемом объекте, но и наглядное отображение этих процессов на карте его территории.

1. ОБЗОР ТЕРРИТОРИАЛЬНЫХ МУЛЬТИАГЕНТНЫХ МОДЕЛЕЙ

Мультиагентный подход на базе ГИС применялся многими исследователями для разработки инструментов территориального прогнозирования и планирования. Причем спектр проблем, для анализа и поиска решения которых создавались АОМ, очень широк. Остановимся на некоторых из них.

1.1. Управление в условиях стихийных бедствий

В работе японских ученых [4] представлена интегрированная система моделирования землетрясений и вызванных ими последствий, предназначенная для проектирования и апробации систем ликвидации этих последствий. Речь идет о разработке систем оповещения жителей, о выборе схем размещения пунктов оказания первой помощи и приютов для пострадавших, об определении первоочередности аварийно-восстановительных работ, об организации вывоза мусора и т. д. Одним из ключевых компонентов данной интегрированной системы является мультиагентная модель, позволяющая имитировать развитие последствий катастроф во взаимодействии с деятельностью большого множества людей. Агенты-люди в модели — это не только пострадавшие, но и специалисты, участвующие в спасательных работах, такие как пожарные, спасатели, медицинские работники, возможности которых по оказанию помощи ограничены, что также в модели учитывается.

1.2. Управление природными ресурсами

В коллективной монографии [5] отдельная глава посвящена мультиагентным системам (МАС), разработанным для имитации и анализа различ-



ных процессов, связанных с природопользованием. Представлены следующие МАС:

- модель для изучения взаимосвязи между диверсификацией сельскохозяйственных культур и риском деградации земель в северном Таиланде [5, p. 167–190];
- модель для анализа зависимости биофизических условий выращивания риса от различных стратегий водопользования фермеров [5, p. 191–210];
- модель для анализа экономических эффектов и рисков при различных пропорциях двух видов сельскохозяйственной деятельности в дельте реки Меконг — выращивания риса и разведения креветок [5, p. 211–236];
- модель для анализа влияния изменений в методах землепользования на ландшафтную эволюцию пригородных сельскохозяйственных систем [5, p. 237–254];
- модель лесопользования, в которой заинтересованными сторонами являются те, кто выращивает лес на плантации в штате Сабах, и те, кто занимается лесозаготовками и обработкой древесины [5, p. 275–294].

Все эти модели разработаны на примере конкретных территорий, для экономики которых именно моделируемые процессы являются ключевыми, и во всех этих моделях агентами являются люди-жители данных территорий. Агенты-люди в моделях в стремлении максимизировать свои доходы выбирают тот или иной вид (или способ) деятельности, каждый из которых характеризуется определенным уровнем использования основных природных ресурсов. Указанные модели позволяют анализировать взаимное влияние социальных процессов и динамики экологических параметров территорий и предназначены для поиска рациональных компромиссов между интересами различных видов деятельности (и занятых ею людей) для предотвращения деградации земель, справедливого использования возобновляемых ресурсов и смягчения конфликтов.

1.3. Управление расширением городской территории

Разрастание городов и сопровождающий его кризис развития муниципалитетов в сфере предоставления услуг — таких, как чистая вода, утилизация отходов, аварийные службы и охрана правопорядка, — является одной из основных проблем, стоящих перед регионами по всему миру, не случайно среди описанных в литературе мультиагентных моделей довольно много посвящено этому вопросу. Отмеченные далее наиболее известные из подобных моделей создавались как инструменты, позволяющие в комплексе изучать процессы разрастания городов с учетом поведения отдельных

экономических акторов, действующих на территории этих городов, а также как инструменты апробации различных стратегий местных органов власти и оценки их влияния на эволюцию своих городов.

Интерактивная имитационная модель развития города CityDev [6] включает в себя агентов, товары и рынки и работает на 3D пространственной структуре, которая организована в кубические ячейки. Типы агентов, присутствующих в модели:

- семьи (группа жителей из ста человек, проживающих в одной 3D ячейке);
- производственные и коммерческие фирмы;
- частные фирмы, производящие услуги;
- государственные учреждения,
- застройщики.

Каждый агент производит товары, используя другие товары, и торгует произведенными товарами на рынках. Агенты-семьи могут выбирать место жительства и место работы, а также товары для потребления, минимизируя свои расходы. А агенты-организации — место расположения производства и объем этого производства, причем коммерческие организации максимизируют свою прибыль, а государственные учреждения ориентированы на максимизацию общественной полезности. Агенты-девелоперы также максимизируют свою прибыль, выбирая, какой земельный участок купить, где и какого типа здания строить — жилые, промышленные или коммерческие — в зависимости от спроса и цен.

Кроме симуляции результатов активности агентов, модель CityDev позволяет также и пользователям активно принимать участие в своей работе, управляя развитием города в соответствии с планом строительства новых дорог и размещения объектов общественного назначения. Администрирование осуществляется с помощью управления государственными услугами и, возможно, изменения градостроительного кодекса.

Модель разрастания пригородов [7] включает в себя агентов четырех классов, представляющих различные типы стейкхолдеров, заинтересованных в развитии земельных участков:

- агенты-землевладельцы соответствуют владельцам крупных свободных земельных участков, пригодных для жилищного, коммерческого или промышленного развития;
- агенты-девелоперы играют роль строителей жилых, коммерческих или промышленных сооружений;
- агенты-домовладельцы соответствуют множеству жителей отдельных территорий;
- агенты-правительственные учреждения имитируют деятельность муниципальных органов власти.

Процедура принятия решений относительно характера развития земельных участков, выполняющаяся на каждом шаге работы модели (одному году в реальной действительности), включает в себя действия агентов каждого типа, производимые в определенной последовательности. Вначале агенты-землевладельцы решают, выгодно ли им продать свои участки. Затем для поступивших в продажу участков выбирается наиболее перспективное направление развития и соответствующая категория агентов-девелоперов, которые представляют свои предложения правительственному агенту и информируют о нем агентов-домовладельцев, которых данный проект затрагивает. Агенты-домовладельцы решают, будут ли они протестовать против данного проекта, что влияет в модели на решение правительственных агентов о том, что с проектом делать: утверждать, утверждать с изменениями или отклонять. Причем влияние агентов-домовладельцев на решение властей зависит не только от количества недовольных, но и от значимости недовольных домовладельцев (их «весов»), возрастающей с увеличением их дохода.

После принятия решений по всем участкам земли имитируется воздействие выполнения этих проектов на природную среду. Агенты-домовладельцы снова определяются с лояльностью действующей власти и как бы «голосуют» за тот или иной тип правительственного агента, который будет действовать на следующем временном интервале (каждому типу соответствует своя политика в развитии территорий).

Модель для прогнозирования расширения Большого Торонто [8] работает на 2D пространственной структуре, в которой каждая клетка соответствует участку земли на местности и имеет несколько экзогенных характеристик, таких как тип землепользования, качество природной среды, рельеф местности. Кроме того, каждая клетка характеризуется доступностью общественных благ для жителей, проживающих на этом участке. Под доступностью понимается близость от транспортных сетей — шоссе, железных дорог, а также от таких объектов, как парки, больницы, школы и торговые центры.

В модель входят:

- агенты-жители;
- агенты-девелоперы;
- агенты-местные власти.

Агенты-жители подразделяются на две категории: коренные жители и вновь прибывшие, так как их требования к жилой застройке резко различаются. Так, для всех агентов-жителей привлекательность земельных участков для проживания пропорциональна качеству природной среды и доступности общественных благ. Но для агентов-новичков, выбирающих место для застройки, важно

минимизировать стоимость строительства (которая зависит от рельефа местности), а агенты-старожилы предпочитают жить в малонаселенной местности и имеют возможность препятствовать появлению новых жителей (протестовать). Агенты-девелоперы разрабатывают проекты застройки, максимизируя свою ожидаемую прибыль, а правительственные агенты выдают или не выдают разрешения на строительство, учитывая и уровень протеста местных жителей.

1.4. Управление транспортной инфраструктурой города

В монографии [2, *гл. 4*] представлена модель работы транспортной системы города Москвы, в которой присутствуют агенты трех типов:

- агенты-люди;
- агенты-легковые автомобили;
- агенты-единицы общественного транспорта.

Агенты-транспортные средства движутся по дорогам города, причем агент-автомобиль способен передвигаться по любым дорогам, но перевозит в среднем двух человек, а агенты, относящиеся к наземному городскому транспорту, передвигаются по заданным маршрутам, перевозя до 150-ти пассажиров. В модели агенты-люди, которым необходимо добраться из одного пункта на территории Москвы в другой, выбирают маршрут, используя или автомобиль, или общественный транспорт, возможно, с пересадками. Модель наглядно демонстрирует образование автомобильных пробок и предназначена для апробации различных мер для улучшения транспортной ситуации в городе.

1.5. Управление сегрегацией населения города

Городская сегрегация — разделение жилых районов города по локализации в них различных групп населения — широко распространенное явление, вызывающее напряжение в обществе и представляющее собой значительное препятствие для достижения социальной интеграции в городах. Чтобы смягчить остроту этой проблемы, необходимо проводить политику, основанную на лучшем понимании процессов сегрегации и прогнозирования ее динамики. Моделирование механизмов, формирующих городскую сегрегацию в зависимости от изменения структуры населения и с учетом поведения отдельных экономических акторов, действующих на территории городов, позволяет создавать инструменты для апробации различных стратегий местных органов власти. Рассмотрим примеры применения агент-ориентированного подхода для создания подобных инструментов.

Модель расселения жителей города по этническому признаку [9]. Агенты в модели — жители го-



рода Яффа (Израиль), которые делятся на три группы:

- агенты-иудеи (евреи);
- агенты-мусульмане (арабы);
- агенты-христиане (арабы).

Агенты, недовольные своим жильем, подыскивают себе другое, стремясь снизить дискомфорт, который может быть вызван как непривычным архитектурным стилем здания (возможны традиционный восточный дом или современная постройка), так и нежелательными соседями. При этом все агенты предпочитают проживать в окружении себе подобных, и проявляют разной степени нетерпимость к соседям из других групп, к тому же вкусы агентов из разных групп относительно архитектурного стиля жилья также различаются.

Модель работает на двумерной пространственной структуре, в которой территория города разбивается на земельные участки по правилу многоугольников Вороного с заданным пороговым значением расстояния между центрами соседних многоугольников. Затем для каждого агента-жителя в качестве окрестности, занимаемой значимыми для него соседями, рассматривается многоугольник Вороного с центром в доме проживания этого агента. Поскольку границами многоугольников в модели могут служить и дороги, то полученная таким образом окрестность, в основном, состоит из домов по одной стороне улицы, которые видны от данного дома.

В модели также учитывается миграция, причем миграционный приток задается экзогенно как параметр модели, а миграционный отток формируется из агентов-жителей, не нашедших подходящего свободного жилья.

Модель расселения жителей города по уровню доходов [10]. Агенты в модели — жители города Сан-Жозе-дус-Кампус (Бразилия), которые делятся на группы по уровню дохода. Доступные для агента действия (варианты выбора):

- остаться в текущем местоположении;
- сменить место жительства в том же районе;
- переехать в район того же типа (например, из одного неоднородного в социальном плане района в другой);
- переехать в район другого типа (например, из неоднородного в социальном плане района в однородный).

Каждый агент обладает личностными характеристиками, связанными с его предпочтениями при выборе места проживания, а также характеристиками, присущими той группе, к которой он принадлежит. Так же, как и в описанной ранее модели, агенты предпочитают проживать в окружении себе подобных и подыскивают себе другое жилье, если недовольны своими соседями, в данном случае — их социально-экономическим статусом.

Кроме того, в модели присутствует блок, отвечающий за симуляцию расширения городской территории, причем выбор направления разрастания города, включения в его территорию тех или иных земельных участков происходят случайным образом и описываются с помощью цепей Маркова.

1.6. Управление деловой активностью населения

В работе [11] представлена межрегиональная модель, которая позволяет в комплексе имитировать эволюцию сложных взаимодействий домохозяйств и фирм с учетом их расположения на данной территории и возможных транспортных решений. В модели присутствуют несколько базовых производственных секторов, города (городские районы), включенные в более широкие регионы (или регионы внутри страны), а также агенты нескольких типов:

- агенты-домохозяйства (люди);
- агенты-фирмы;
- агенты-муниципальные (или региональные) органы власти;
- агенты-центральные правительства.

Агенты-люди могут выбирать регион-место жительства, регион-место работы и конкретный вид деятельности для максимизации своего дохода. Агенты-фирмы для максимизации прибыли выбирают локализацию производства (как распределение инвестиций между регионами) и способ распространения своей продукции (рынки сбыта).

Регионы в модели различаются по таким экономическим характеристикам, как стоимость земли, рабочей силы и производственных затрат, а также размеры рынка и спроса. Кроме того, существует явное пространственное представление транспортных связей между регионами, чьи характеристики зависят от конкретной топологии и конфигурации транспортной сети. Отрасли производства отличаются друг от друга значимостью фактора труда и капиталоемкостью, требованиями к уровню трудовых навыков работников и отдачей от масштаба производства. Все это влияет на решения агентов-людей, касающихся поездок на работу, выбора места работы и миграции, а также на решения агентов-фирм.

Агенты-власти разного уровня в пределах своих полномочий могут управлять такими переменными, как ставки различных налогов, а также осуществлять государственные инвестиции, включая инвестиции в развитие транспортной сети системы городов. Меняя значения этих параметров, можно апробировать различные варианты налоговой и инвестиционной политики.

Все рассмотренные мультиагентные модели были реализованы в программных системах, откалиброваны на реальных данных и использованы при проведении вычислительных экспериментов

по апробации возможных управляющих воздействий. Как видно даже из приведенного обзора, этот подход оказывается продуктивным при моделировании самых разнообразных процессов, участниками которых служат самостоятельные экономические акторы, способные принимать сигналы из внешней среды и действовать в соответствии со своими интересами.

Отдельно отметим комплексную имитационную модель муниципального образования (МО) Н.А. Бегунова [12], назначение и концепция которой очень близки к тем задачам и подходам к их решению, которые реализуем мы при создании своей модели МО. Речь идет об имитации в рамках одной модели экономической жизни территориального объекта с учетом сложной иерархии действующих на данной территории самостоятельных экономических акторов, а также сложной конструкции самих агентов и их взаимозависимости. Такая модель призвана позволить одновременно рассматривать динамику нескольких процессов, поскольку каждый экономический актор играет в реальной жизни не одну роль, и его действия, соответственно, влияют на множество характеристик территории — и на экономические, и на экологические, и на социальные.

В модели муниципального образования Н.А. Бегунова рассматриваются типы агентов:

- агенты-люди (домашние хозяйства), максимизирующие полезность от приобретаемых ими товаров и услуг;
- агенты-фирмы, максимизирующие свою прибыль;
- агенты-государственные органы управления, с помощью налоговых механизмов пытающиеся создать благоприятную социально-экономическую среду для развития территории.

Моделирование производственной деятельности агентов-фирм состоит из двух этапов: первый — получение потенциального выпуска на основе использования производственных функций, включающих в себя фактор труда (в качестве которого выступают агенты-люди, работающие в фирме), второй — корректировка полученного значения на основе межотраслевого баланса для учета реального спроса на продукцию фирм. Отдельно выделяются предприятия отраслей, ориентированных на экспорт продукции, и отраслей, спрос (и цены) на продукцию которых формируется внутри МО.

Поведение агентов в модели определяется стадиями их жизненного цикла, но механизмы выбора у агентов разных типов различаются. Так, действия агентов-людей основаны на матрице решений, задающей выбор агента на множестве ситуаций, а действия агентов-фирм — на целевых функциях, определяющих логику их поведения, когда конкретные ситуации могут быть заранее не

определены. Взаимодействуя между собой, агенты образуют рыночную инфраструктуру: рынок товаров и услуг, рынок труда, рынок недвижимости, финансовый рынок и др., что влияет на доходы бюджета МО и бюджетов других уровней. Интерфейс модели позволяет пользователю экспериментировать, апробируя реализацию различных проектов путем ввода новых промышленных агентов и/или изменения характеристик уже существующих.

2. ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ МУНИЦИПАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

Цель настоящей работы состоит в создании компьютерной АОМ, настолько реалистично имитирующей внутреннее устройство экономической жизни муниципального образования, чтобы позволять органам государственного управления и/или органам местной власти апробировать различные варианты управляющих воздействий, оценивать возможные социально-экономические последствия этих воздействий, а также позволять сравнивать варианты стратегий для выбора наиболее приемлемой. В основу мультиагентной модели положено детализированное описание ее агентов как участников процессов формирования, накопления и реализации трудового потенциала жителей муниципальных образований, что и обуславливает благополучие экономики региона в целом. К муниципальным образованиям относятся и сельское поселение, и городской округ, и муниципальный район, поэтому очевидно, что существенно разнятся не только масштабы таких объектов, но и отраслевая структура их экономик, и наиболее злободневные проблемы, и средства, доступные администрации для решения этих проблем. Кроме того, состояние любого МО в значительной мере зависит от состояния и действий более крупных административных единиц, на территории которых оно располагается, а также от состояния и действий (в том числе, совместных) соседних муниципальных образований, поэтому компьютерная модель рассматривает МО в составе региона (субъекта Российской Федерации).

В создаваемой АОМ присутствуют агенты двух типов, соответствующих основным видам экономических акторов, действующих на территории МО и образующих иерархию агенты-физические лица (люди — жители региона) → агенты-юридические лица (предприятия, организации). Агентами третьего уровня иерархии служат МО на территории региона-субъекта РФ, а на последнем уровне находится сам регион. Автоматами в модели представлены только агенты первого типа — люди, а изменение характеристик агентов остальных типов доступно пользователю-эксперту для



имитации различных вариантов управляющих воздействий.

Агенты-люди и агенты-организации обладают определенными наборами характеристик, обуславливающих их ценность в смысле предназначенной им в модели роли в общественном производстве, причем часть из этих характеристик сохраняют постоянное значение, а часть — изменяются во времени и/или вследствие каких-либо процессов, происходящих в модели. К таким характеристикам агентов-людей относятся уровень образования, уровень здоровья и трудовой стаж, а агентов-организаций — трудовой потенциал работников, основные фонды и располагаемые финансовые средства. Агрегирование этих частных характеристик позволяет оценить общую «полезность» каждого отдельного агента, которая в модели для агентов-людей соответствует их трудовому потенциалу [13], а для агентов следующих уровней представляет собой функцию от суммарного трудового потенциала включенных в них агентов-людей.

Роль внешней для агентов среды играют агенты вышестоящих уровней иерархии (агенты одного уровня в модели напрямую не контактируют друг с другом). Так, для агентов-людей ими выступают агенты-организации, агенты-муниципальные районы и регион в целом, т. е., в соответствии с общепринятой терминологией [14], описываемая модель относится к классу SNP^n -моделей (Social Norm Promotion with n influential groups) — агент-ориентированных моделей поощрения социальных норм с n группами влияния, где $n = 3$. Внешняя среда выполняет в модели и ограничительную функцию, задавая, с одной стороны, условия, необходимые для реализации возможностей агентов, а с другой — имитируя спрос на производимую ими «продукцию» (содержание понятия «продукция» определяется ролью, которая предназначена в модели тому или иному агенту).

Перечислим условия внешней среды, влияющие на состояние агентов-людей.

Условия, зависящие от места жительства — рабочее место; налоговая нагрузка; инфраструктура; системы здравоохранения и образования. Работа системы здравоохранения в модели влияет на состояние здоровья населения, которое служит одним из элементов трудового потенциала, а система образования обеспечивает необходимый уровень квалификации работников, т. е. также влияет на величину их трудового потенциала. Спрос определяет наличие рабочих мест на рынке труда.

Условия, зависящие от места работы, основаны на понятии организационной культуры как специфического для каждой организации набора целей и соответствующих критериев эффективности деятельности, а также ключевых факторов, определяющих эту эффективность [15]. Организационная

культура определяет стабильность организации, а также спрос на такие свойства агентов-работников, как активность и квалификация — если агент соответствует требованиям организации, в которой он работает, то возрастают результаты его труда и заработная плата.

Агенты-организации разделяются на две категории.

Агенты-предприятия реального сектора, т. е. предприятия, производящие продукцию — промышленность и сельское хозяйство, а также предприятия сферы услуг, отнесенные к инфраструктуре. Продукция, производимая этими предприятиями, может поступать как на муниципальный и региональный рынки, так и экспортироваться за пределы региона, соответственно подразделяется и спрос на продукцию.

Агенты-организации социальной сферы — образование и здравоохранение, а также наука и государственное управление. Качество выполнения этими системами своих функций оценивается по степени охвата их услугами целевых групп, а также обеспечения соответствующих нормативов финансирования по сравнению с базовым годом.

Условия внешней среды, влияющие на состояние агентов-организации:

региональные — естественное движение населения (смертность, рождаемость); налоговая нагрузка (для предприятий реального сектора); денежные средства, выделяемые из бюджета; спрос на продукцию;

зависящие от муниципального района, в котором находится организация — трудовые ресурсы; инфраструктура; спрос на продукцию.

Поведение агентов-людей и агентов-предприятий имитируется на основе целевых функций, для чего агенты наделяются «системой ценностей» (предпочтений). Так, агенты-люди трудоспособного возраста стремятся к стабильной занятости и высокому заработку, а агенты-организации — к увеличению «продукции» и поддержанию требуемого уровня квалификации работников. Агенты-люди могут менять место работы и место жительства, а агенты-организации — нанимать или увольнять работников и управлять оплатой их труда.

На каждом шаге работы модели (шаг соответствует одному году в реальной действительности) агенты, занятые в производстве, анализируют доступную им информацию о характеристиках среды и собственном положении в ней и в соответствии со своей системой ценностей переходят в то или иное состояние: «нормальное» (стартовое), «недовольство» и «критическое» (необходимость срочных действий). Если состояние какого-либо агента отлично от нормального, то это побуждает его к реакции, которая будет зависеть не только от самого состояния и от значений остальных характе-

ристик агента, но и от возможностей, которые предоставляет ему внешняя среда. Реализованный в модели алгоритм поведения агентов основан на структуре поведенческого акта из теории функциональных систем физиолога П.К. Анохина [16], включающей в себя стадии идентификации ситуации взаимодействия с внешней средой как требующей принятия каких-либо мер; постановки целей действия и формирования его программы; реализации действия и оценки достигнутого результата. Таким образом, поведение агентов является функцией структуры их личности и характеристик внешней среды, что для агентов-людей согласуется с теорией личности Р. Кеттела [17].

Самостоятельную задачу представляет собой создание механизмов, позволяющих связать трудовой потенциал агентов-людей и реальную отдачу от их трудовой деятельности, для чего в модели используются не производственные функции, а некие аналоги их производных; т. е. задается первоначальный объем производства базового года (для предприятий реального сектора — в денежном выражении, а для организаций социальной сферы как уровень выполнения соответствующей функции) и экспертно задаются коэффициенты, указывающие процент, на который увеличивается/уменьшается объем производства агента-организации при росте/снижении каждого факторного показателя и каждого влияющего показателя внешней среды на 1 %. Далее на следующих шагах работы модели результат деятельности рассчитывается как изменение объема базового года, вызванное изменением влияющих внутренних факторов и внешних условий с учетом их значимости.

В модели формируется консолидированный бюджет региона с выделением бюджетов входящих в регион муниципальных образований. Доходы бюджетов складываются из налоговых отчислений агентов-предприятий реального сектора и налога на доходы физических лиц — как доли от заработной платы агентов-людей, занятых во всех видах деятельности. Ставки налоговых отчислений как доли от объема произведенной продукции, а также пропорции распределения налоговых поступлений между бюджетами двух уровней задаются отдельно для каждого вида деятельности. Кроме того, за счет части налоговых поступлений образуются два региональных фонда, используемые для выравнивания бюджетной обеспеченности различных муниципальных образований: «Региональный фонд финансовой поддержки муниципальных районов (городских округов)» и «Региональный фонд компенсаций». Процедуры формирования и распределения средств этих фондов между муниципальными образованиями региона в модели соответствуют существующему законодательству в сфере межбюджетных отношений [18].

Далее поступившие в бюджет средства распределяются между такими видами деятельности, как государственное управление, образование, здравоохранение, наука и культура. В модели эти сферы полностью финансируются из бюджета в соответствии с нормативами бюджетных расходов. Оставшиеся бюджетные средства могут вкладываться в реализацию различных проектов для развития инфраструктуры и других отраслей реального сектора.

3. АПРОБАЦИЯ МОДЕЛИ

Прототип модели реализован в виде пользовательского программного продукта, разработанного в среде AnyLogic [19] на примере муниципальных районов Вологодской области с привязкой к ее карте [20]. Симулятор настроен на апробацию различных стратегий управления доходами и расходами бюджетов двух уровней: бюджета области и бюджетов муниципальных районов при некоторых предположениях о развитии общей экономической ситуации в стране, что и обусловило требования к его интерфейсу, такие как набор управляемых параметров, а также характер и форма отображения результатов работы модели. Основными параметрами модели, с помощью которых экспериментатор может управлять протекающими в симуляторе процессами (так же, как и реальными рычагами воздействия администрации МО на его социально-экономическое состояние), служат показатели налогового бремени и нормативы бюджетных расходов на отрасли социальной сферы, а также средства, вкладываемые в развитие отраслей реального сектора. Выбор отображаемых в интерфейсе результатов симуляций связан с критериями оценки благополучия социально-экономического состояния МО и осуществлялся с учетом требований, предъявляемых к органам исполнительной власти МО со стороны государства [21]. Таким образом, модель можно использовать в качестве инструмента планирования при бюджетировании, ориентированном на результат, т. е. при распределении бюджетных ресурсов в согласовании с целями, задачами и функциями органов управления.

Для калибровки модели использовались данные о состоянии Вологодской области в базовом (2004) и последующих годах, представленные в сборниках Росстата. Кроме того, были использованы результаты обследований, проведенных Институтом социально-экономического развития территорий РАН (г. Вологда) [22]. Модель откалибрована таким образом, чтобы статистические данные, рассчитанные на множестве агентов, совпадали с реальными данными официальной статистики о численности населения каждого муниципального района и его половозрастном составе,



а также о структуре занятости по видам деятельности, полу, возрасту и уровню образования работников с соответствующей дифференциацией заработной платы. Адекватность модели подтвердили проведенные с ее использованием численные эксперименты по имитации динамики состояния населения Вологодской области, ее муниципальных районов и предприятий на их территории при разных значениях управляемых параметров.

Рассмотрим, например, эксперимент по управлению межбюджетными отношениями. Вопрос о распределении полномочий между властями разного уровня и соответствующих финансовых средств между бюджетами этих уровней весьма актуален, и вокруг него не прекращается дискуссия. С одной стороны, государство стремится к выравниванию уровней социального обеспечения граждан независимо от места их проживания, а для этого требуется концентрация средств в федеральном и региональных бюджетах, так же, как и для реализации крупных инфраструктурных проектов. С другой стороны, уверенность местных властей в том, что проблемы их муниципалитетов будут решены благодаря дотациям из различных фондов, не стимулирует эти власти к эффективной работе. Эксперимент, проведенный на нашей модели, заключался в перераспределении налоговых поступлений между областным бюджетом и бюджетами муниципальных районов при неизменной общей налоговой нагрузке на предприятия различных отраслей, а также на работающих жителей области. Целью эксперимента было проследить влияние перераспределения налоговых поступлений на такие характеристики муниципальных районов, как самообеспеченность их бюджетов и бюджетная обеспеченность на одного жителя.

Эксперимент показал, что хотя средний объем бюджета МО, приходящийся на одного жителя, возрастает при увеличении доли налоговых поступлений, остающихся в местном бюджете, но одновременно возрастает и дифференциация районов по этому показателю. На рисунке представлено сопоставление самообеспеченности различных вариантов бюджетов МО в предположении, что расходы остаются на уровне варианта 1 бюджета. (Вариант 1 соответствовал фактическим пропорциям, а варианты 2 и 3 отличались от него все возрастающей долей оставляемых в муниципальном бюджете собираемых средств).

На рисунке видно, что при третьем варианте доходы семи муниципальных образований из 28 превышают расходы базового варианта (самообеспеченность бюджетов свыше 100 %), а доходы бюджетов еще пяти районов почти покрывают расходы (самообеспеченность больше 90 %). Однако даже и такое перераспределение налоговых поступлений большинству муниципальных райо-



Сопоставление самообеспеченности расходов бюджетов МО варианта 1 при разных вариантах доходов, %

нов не позволяет обойтись без дотаций. Иными словами, эксперимент показал, что с помощью одного только перераспределения налоговых поступлений не удалось добиться самообеспеченности муниципальных бюджетов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная мультиагентная модель представляет собой попытку создания инструмента для апробации механизмов регионального управления с учетом человеческого фактора. Вот те основные особенности модели, которые делают ее таким инструментом.

Прежде всего, это моделирование структуры региона как сложной иерархической системы, включающей в себя самостоятельных экономических агентов разного уровня, где основой служат агенты — жители региона.

Далее, это моделирование структуры личности и поведения агентов с учетом их дифференциации, что позволяет отследить различное влияние управленческих мер на отдельных агентов и группы таких агентов. Общество неоднородно, и это может оказаться существенным для прогнозирования его реакции на изменение экономической ситуации и/или правил игры, задаваемых сверху. Это перекликается с подходом поведенческой экономики [23], а, по мнению С. Делавиньи, «нужно шире применять идеи поведенческой экономики в государственной политике» [23, с. 106].

Наконец, это построение цепочек зависимостей, позволяющих смоделировать также и ответное влияние состояния и трудовой деятельности

агентов-людей на экономические и социальные показатели региона, такие, например, как удельный трудовой потенциал работающих и доля удовлетворенных жизнью жителей. В модели такое влияние учитывается с помощью различных процедур агрегирования характеристик агентов нижестоящих уровней для получения характеристик агентов следующих уровней.

Таким образом, с помощью процедур расчета доходных и расходных статей бюджетов двух уровней в соответствии с заданными уровнем налоговой нагрузки и параметрами межбюджетных отношений, процедур расчета состояний агентов-жителей региона и моделирования их поведения в качестве работников, процедур агрегирования трудовых потенциалов агентов и оценки результатов их труда выстраиваются цепочки влияния действий пользователя на выходные параметры модели. В частности, конструкция модели призвана наглядно демонстрировать зависимость интегральных показателей региона от бюджетных расходов на социальную сферу как инвестиций в человеческий капитал.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бурков В.Н., Новиков Д.А. Теория активных систем: состояние и перспективы. — М.: СИНТЕГ, 1999. — 128 с.
2. Макаров В.Л., Бахтизин А.Р. Социальное моделирование — новый компьютерный прорыв (агент-ориентированные модели). — М.: Экономика, 2013. — 295 с.
3. Тарасов В.Б. От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика. — М.: Эдиториал УРСС, 2002. — 352 с.
4. Goto Y., Takeuchi I. and Kakumoto S. Integrated earthquake disaster simulation systems for the highly-networked information society // Proc. of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, — Vancouver (Canada), 2004. — Paper No. 2793. URL: http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/13_2793.pdf (дата обращения: 09.08.13).
5. Companion modeling and multi-agent systems for integrated natural resource management in Asia / Ed. by F. Bousquet, G. Trébuil, and B. Hardy. — Los Baños (Philippines): International Rice Research Institute, 2005. — 360 p.
6. Semboloni F., Assfalg J., Armeni S., Gianassi R. and Marsoni F. CityDev, an interactive multi-agents urban model on the web // Computers, Environment and Urban Systems. — 2004. — Vol. 28, N 1. — P. 45—64.
7. Monticino M.G., Brooks E., Cogdill T., Acevedo M. and Callicott B. Applying a Multi-Agent Model to Evaluate Effects of Development Proposals and Growth Management Policies on Suburban Sprawl // Proc. of the International Environmental Modelling and Software Society, Summit on Environmental Modelling and Software. — Burlington (USA), 2006. URL: http://www.math.unt.edu/~monticino/papers/multi-agent_development.pdf (дата обращения: 09.08.13).
8. Rui Y., Ban Y. Multi-agent Simulation for Modeling Urban Sprawl In the Greater Toronto Area // Proc. of the 13th AGILE International Conference on Geographic Information Science. — Guimarães (Portugal), 2010. URL: http://plone.itc.nl/agile_old/Conference/2010-guimaraes/ShortPapers_PDF%5C124_DOC.pdf (дата обращения: 09.08.13).
9. Benenson I., Omer I., Hatna E. Entity-based modeling of urban residential dynamics: the case of Yaffo, Tel Aviv // Environment and Planning B: Planning and Design. — 2002. — Vol. 29. — P. 491—512.
10. Feitosa F.F., Le Q.B., Vlek P.L.G. Multi-agent simulator for urban segregation (MASUS): A tool to explore alternatives for promoting inclusive cities // Computers, Environment and Urban Systems. — 2011. — Vol. 35, N 2. — P. 104—115.
11. Tsekeris T., Vogiatzoglou K. Multi-Regional Agent-Based Economic Model of Household and Firm Location and Transport Decisions // Proc. of the 10th STRC Swiss Transport Research Conference. — Monte Verità, 2010. URL: <http://www.strc.ch/conferences/2010/Tsekeris.pdf> (дата обращения: 09.08.13).
12. Бегунов Н.А. Моделирование развития муниципальных образований на основе агентного подхода // Современные исследования социальных проблем. — 2011. — № 4. — С. 1—18.
13. Гулин К.А., Шабунова А.А., Чекмарева Е.А. Трудовой потенциал региона / Под рук. В.А. Ильина. — Вологда: ИСЭРТ РАН, 2009. — 84 с.
14. Bloomquist K.M. A comparison of agent-based models of income tax evasion // Social Science Computer Review. — 2006. — Vol. 24, N 4. — P. 411—425.
15. Камерон К., Куинн Р. Диагностика и измерение организационной культуры. — СПб.: Питер, 2001. — 320 с.
16. Судаков К.В. Общие принципы построения поведенческих актов на основе теории функциональных систем // Системные механизмы поведения / Под ред. К.В. Судакова, М. Баича. — М.: Медицина, 1990. — 939 с.
17. Холл К., Линдсей Г. Теории личности / Пер. с англ. — М.: Изд-во Ин-та психотерапии, 2008. — 672 с.
18. Закон Вологодской области «О межбюджетных трансфертах в Вологодской области» от 04.07.2005 г. № 1308-ОЗ (с последующими изменениями). URL: http://www.df35.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=241:q-q-4-2005-1308-&catid=86:2012-04-16-07-46-48&Itemid=116 (дата обращения: 09.08.13).
19. XJ Technologies. Simulation Software and Services. URL: <http://www.xjte.com/> (дата обращения: 09.08.13).
20. Сушко Е.Д. Мультиагентная модель региона: концепция, конструкция и реализация / Препринт # WP/2012/292. — М.: ЦЭМИ РАН, 2012. — 54 с.
21. Указ Президента РФ от 28.04.2008 г. № 607 «Об оценке эффективности деятельности органов местного самоуправления городских округов и муниципальных районов» (в ред. Указа Президента РФ от 13.05.2010 № 579).
22. Амелин Д.Е. Местное самоуправление в региональном развитии. — Вологда: ВНКЦ ЦЭМИ РАН, 2006. — 182 с.
23. Делавинья С. Психология и экономика: результаты эмпирических исследований. Часть III. Нестандартное принятие решений и реакция рынка // Вопросы экономики. — 2011. — № 4. — С. 82—106.

Статья представлена к публикации членом редколлегии чл.-корр. РАН Д.А. Новиковым.

Валерий Леонидович Макаров — директор, академик РАН, ☎ (499) 129-10-11, ✉ makarov@cemi.rssi.ru,

Альберт Рауфович Бахтизин — д-р экон. наук, вед. науч. сотрудник, ☎ (499) 129-07-44, ✉ cgemodel@yandex.ru,

Елена Давидовна Сушко — канд. экон. наук, ст. науч. сотрудник, ☎ (499) 129-38-22, ✉ sushko_e@mail.ru.

Центральный экономико-математический институт РАН, г. Москва.