

Опыт построения гибридной агент-ориентированной модели с нейронными сетями¹

А.Р. Бахтизин, Н.В. Бахтизина

Hybrid agent-based models with neural networks

A.R. Bakhtizin, N.V. Bakhtizina

Аннотация

В статье предлагается методология построения гибридных агент-ориентированных моделей с использованием нейронных сетей, позволяющих преодолеть недостатки известных методов математической формализации поведения агентов микроуровня.

Ключевые слова: агент-ориентированные модели, вычислимые модели общего равновесия, нейронные сети

Abstract

The paper proposes a methodology for constructing hybrid agent-based models with neural networks. The models allow overcoming the drawbacks of other existing methods, which employ mathematical formalization of micro level agents.

Введение

В большинстве математических моделей, изучающих макроэкономические системы, поведение таких микроэкономических агентов, как отдельные домохозяйства, зачастую не рассматривается достаточно подробным образом. Тем не менее, особенности поведения именно этих агентов должны приниматься во внимание при прогнозировании последствий того или иного государственного управленческого решения.

Обычно в макроэкономических моделях либо описывается поведение агрегированного домохозяйства (инструментарием в этом случае является оптимизация соответствующей функции полезности); либо в модель включаются рассчитанные ранее экзогенные параметры, отражающие результаты экономических решений домохозяйств. В экономической литературе эти два подхода часто подвергаются обоснованной критике, поскольку в большинстве случаев они не позволяют получить в рамках таких моделей реалистичные оценки взаимодействия домашних хозяйств и реального сектора экономики.

Вместе с тем, в 1960-е годы возникло новое научное направление – компьютерное имитационное моделирование, которое в настоящее время включает три следующих типа:

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МД-4319.2009.6.

системная динамика (СД), дискретно-событийное (ДС) моделирование и агентное моделирование. Последнее является самым современным.

Все эти виды моделирования применяются в том числе для решения социальных и экономических задач на разных уровнях абстракции. СД в основном используется для решения задач на высоком уровне абстракции; в свою очередь модели ДС используются на низком и среднем уровнях, а агентное моделирование применимо на всех уровнях [13]. Отметим, что к высокому уровню абстракции относятся, к примеру, задачи прогнозирования динамики населения страны; на низком уровне реализуются микроуровневые модели (например, модели движения пешеходов); наконец к среднему уровню относятся задачи, связанные, к примеру, с оптимальным планированием перевозок внутри региона и т.п.

Агентное моделирование, развитие которого напрямую определяется увеличивающимися вычислительными возможностями современных компьютеров, позволяет представить (смоделировать) систему практически любой сложности из большого количества взаимодействующих объектов, не прибегая к их агрегированию. Появились программные средства (к примеру, AnyLogic [14]), позволяющие сочетать все вышеперечисленные направления имитационного моделирования.

Вместе с тем, наибольшие трудности возникают при совмещении объектов разного уровня абстракции в рамках одной модели. В этой связи разработчики математических моделей социально-экономических систем все чаще ставят вопрос об актуальности проблем построения иерархических динамических моделей, включающих в себя субъектов макроуровня и агентов микроуровня, поведение которых должно быть описано более реалистично, нежели применяемые на практике методы их представления.

Обозначенную проблему, как будет показано в статье, можно решить путем построения гибридных агент-ориентированных моделей (ГАОМ), представляющих собой новое научное направление. Помимо этого, для моделирования реакции домашних хозяйств на сигналы макросистемы будут использованы нейронные сети, которые восполняют пробел в области несовершенства методов математической формализации поведения агентов микроуровня.

1. Постановка проблемы

Разработке агент-ориентированных моделей (АОМ) посвящено большое количество работ и на основе анализа публикаций в данной области можно сделать следующие выводы:

1. Подавляющее большинство АОМ являются абстрактными, и основная цель их разработки не связана с решением практических задач. Иными словами, модели используют условные данные и создаются в основном для отработки нового инструментария.

2. Среди малочисленной группы моделей, рассматривающих реальное явление или процесс, только небольшая часть имеет отношение к экономической сфере.

3. Однако даже представители этой, небольшой группы моделей, рассматривают только некоторые аспекты микроэкономических явлений.

В статье предлагается методический подход к разработке ГАОМ, путем объединения АОМ, вычислимых моделей общего равновесия (Computable General Equilibrium (CGE) моделей) и нейронных сетей. Отметим, что CGE модели сами по себе также являются новым направлением в прикладной экономике, получившим широкое распространение во всем мире.

По своей сути любая CGE модель представляет собой систему уравнений, решением которой является общее экономическое равновесие, как правило, сводящееся к уравниванию спроса и предложения на рассматриваемых в модели рынках товаров и услуг. Равновесие достигается путем итеративного пересчета с помощью соответствующих прикладных пакетов.

CGE модели можно определить в трех ключевых аспектах. Во-первых, они включают в себя экономических агентов, результаты деятельности которых находят отражение во всей экономической системе. Именно поэтому CGE модели называются *общими*. Обычно в число агентов входят домашние хозяйства, максимизирующие полезность от приобретаемых ими товаров и услуг, и фирмы, максимизирующие свою прибыль. Также в качестве экономических агентов могут выступать правительства и торговые союзы. Во-вторых, CGE модели включают в себя систему уравнений, посредством решения которой достигается равновесие на рынке каждого товара, услуги и фактора производства. Благодаря этому модели становятся *равновесными*. В-третьих, модели выдают количественные результаты, что позволяет называть их *вычислимыми*. CGE моделям посвящено большое количество зарубежной литературы, однако в нашей стране моделям этого класса долгое время не уделялось должного внимания. Тем не менее, в ряде публикаций сотрудников ЦЭМИ РАН и ЦЭФИРа были рассмотрены особенности CGE моделей, их преимущества перед моделями других классов, а также описаны недавно созданные CGE модели России и ее регионов (см., например [1, 8, 10, 11, 12, 15, 17, 18, 19]).

Ниже в краткой форме приведено концептуальное описание работы типовой вычислимой модели общего равновесия, являющейся частным случаем равновесных моделей. Предлагаемый подход к ее модификации более подробно раскрывается на примере модели, рассматривающей домашние хозяйства, принимающие решения о поиске работы и о способе распределения своего бюджета (см. пункт 4).

Вычислимая модель общего равновесия, как правило, включает в себя агентов-производителей, домашние хозяйства и регулирующий орган. Производственные возможности агентов-производителей задаются с помощью производственных функций, где в качестве

аргументов обычно выступают основные фонды, труд и промежуточное потребление. Однако набор факторов может быть и другим.

Вид производственных функций для каждой модели также индивидуален, но чаще всего это модифицированные функции Кобба-Дугласа: $Y = A K^\alpha L^\beta Z^\gamma$, где K , L и Z – основные фонды, рабочая сила и промежуточная продукция соответственно, а α , β и γ – коэффициенты при этих факторах.

Произведенный продукт распределяется по различным направлениям (к примеру, на рынок промежуточной продукции, конечных товаров и т.д.) в соответствии с определенными долями, взятыми (или приближенными) согласно данным государственной статистики. Так, объем произведенной продукции, идущей на рынок промежуточной продукции, определяется следующим образом: $S_z = Y \cdot E_z$, где E_z – соответствующая доля. Суммарное предложение продукции, продаваемой на каком либо из рынков, есть сумма предложений этого вида продукции со стороны всех агентов-производителей. К примеру, для промежуточной

продукции она определяется, как: $S_z^s = \sum_{i=1}^n (S_{iz})$, где i – число секторов, предлагающих данный вид продукции.

В то же время, агенты покупают факторы производства, спрос на которые определяется следующим типовым уравнением (в данном случае на промежуточную продукцию) $D_z = (O_z \cdot B) / P_z$, где O_z – доля бюджета B агента, идущая на покупку промежуточной продукции по цене P_z .

Сумма спросов всех агентов на данный вид продукции представляет собой суммарный спрос, участвующий в уравнении определения равновесной цены:

$P_z [Q+1] = P_z [Q] + (D_{z[Q]}^s - S_{z[Q]}^s) / C$, где Q – шаг итерации, C – константа, влияющая на скорость сходимости модели.

Другой тип агентов вычислимых моделей – домашние хозяйства, получающие от агентов-производителей заработную плату, а от правительства (регулирующего органа) – пенсии, пособия и субсидии. Домохозяйства определяют спрос на конечную продукцию таким же образом: $D_c = (O_c \cdot B_h) / P_c$, где O_c – доля бюджета домашних хозяйств B_h .

Однако в данном случае соответствующие доли либо задаются экзогенно, либо определяются посредством решения задачи максимизации полезности потребителя $U(D_c^1, K, D_c^i) \square \max$.

И тот и другой подходы являются не совсем корректными, поскольку при экзогенно введенных долях домашние хозяйства расходуют средства своего бюджета по одинаковой схеме, независимо от сложившейся экономической ситуации. В случае же определения этих долей путем решения оптимизационной задачи, во-первых, возникают множественные равновесия, а во-вторых – данный способ моделирования поведения домашних хозяйств не позволяет реалистично оценить их взаимодействие с реальным сектором экономики.

В этой связи, для более адекватного отображения поведения людей в разработанной ГАОМ мы применяем совокупность нейронных сетей – одно из направлений искусственного интеллекта (ИИ), более других подходящее для решаемых задач.

Далее, мы дадим краткую характеристику АОМ, а затем приступим к описанию методологии построения ГАОМ.

2. Краткая характеристика АОМ

АОМ это модель, обладающая следующими основными свойствами:

1. *Автономия.* Агенты действуют независимо друг от друга и при этом предполагается, что в моделях нет единой регулирующей структуры, которая контролировала бы поведение каждого агента в отдельности. Однако, при этом взаимодействие микро- и макроуровней в моделях осуществляется, как правило, следующим образом: на макроуровне задается общий для всех агентов набор правил, и, в свою очередь, совокупность действий агентов микроуровня может оказывать влияние на параметры макроуровня.

2. *Неоднородность.* Агенты чем-то различаются друг от друга, что принципиально отличает АОМ от широко распространенных моделей с агентом-представителем, причем различия между агентами могут проявляться по многим параметрам (в случае агентов, отображающих людей, это могут быть параметры уровня здоровья, дохода, культурного уровня, а также правил принятия решений и т.д.).

3. *Ограниченная интеллектуальность агентов (или ограниченная рациональность).* Иными словами агенты модели не могут познать нечто большее, выходящее за рамки макросреды модели.

4. *Расположение в пространстве.* Имеется в виду некоторая «среда обитания», которая может быть представлена как в виде решетки, так и в виде гораздо более сложной структуры, скажем трехмерного пространства с заданными в нем объектами. Тем не менее, иногда для

АОМ непосредственного отображения анимации агентов не требуется и в этом случае моделируется их взаимодействие без учета их пространственного расположения.

Помимо перечисленного, общей особенностью всех АОМ и одновременно с этим их главным отличием от моделей других классов является наличие в них большого числа взаимодействующих друг с другом агентов (так, существуют АОМ, число агентов в которых достигает нескольких миллионов; см. например, модель, разработанную под руководством Дж. Эпштейна [5, 6]).

Преимущества АОМ перед другими средствами имитационного моделирования заключаются в следующем:

1) АОМ позволяют смоделировать систему максимально приближенную к реальности. Как уже говорилось, степень детализации АОМ по сути ограничиваются только возможностями компьютеров. Более того, в ряде АОМ передвижение агентов задается без использования сложных формул, но с помощью заранее определенных маршрутов и простых правил, с одной стороны имитирующих адаптивное мышление в процессе принятия решений, а с другой – позволяющих получить неочевидные результаты на уровне агрегированных параметров. Примерами таких АОМ могут быть модели, имитирующие передвижение пешеходов, покупателей в крупных торговых центрах, спецтехники на складах и т.д.

2) АОМ обладают свойством эмерджентности.

3) Как следует из предыдущего пункта, важным преимуществом агентного моделирования является возможность построения моделей с учетом отсутствия знаний о глобальных зависимостях в рамках моделирования соответствующей предметной области. Важно представлять логику поведения отдельных агентов, что в свою очередь может помочь в получении более общих знаний об изучаемом процессе.

4) АОМ является гибким инструментом, позволяющим легко добавлять и удалять агентов в модели, а также менять параметры и правила их поведения [3].

Считается, что агентное моделирование дополняет традиционные аналитические методы, а также ограниченно включает в себя другие подходы имитационного моделирования, поскольку последние могут применяться «внутри» агентной модели при формализации ее отдельных активных объектов или агентов [22]. 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).

В ЦЭМИ РАН имеется большой опыт по разработке АОМ. Так, наиболее известными являются: АОМ автомобильных пробок в г. Москве [21], АОМ рынка авиаперевозок в московском авиационном узле и АОМ воспроизводства научного потенциала России. Более подробно про АОМ можно прочитать в статье В.Л. Макарова и А.Р. Бахтизина [20].

3. Методология построения ГАОМ: концептуальный взгляд

Как уже говорилось выше, при моделировании реакции домашних хозяйств на сигналы макросистемы мы решили использовать нейронные сети.

В концептуальной модели этот аппарат используется следующим образом. Сначала формулируется цель моделирования поведения домашних хозяйств (к примеру, прогнозирование трудовой мобильности между секторами экономики или прогнозирование спроса на определенную группу товаров), а затем проводится специальное социологическое обследование для получения массива данных относительно реакции людей (в рамках обозначенной цели) на изменение макроэкономической ситуации (как правило, изменение заработной платы). Следует отметить, что специальное обследование имеет смысл проводить только в исключительных случаях, поскольку для большинства задач можно использовать существующие специализированные базы данных мониторингов экономического положения населения России (RLMS или NOBUS).

Далее, в процессе обучения нейронной сети подбирается ее топология с соответственно настроенными значениями ее параметров, наилучшим образом отражающая поведение домашних хозяйств.

Входных переменных нейронной сети, т.е. управляющих параметров макросистемы не так много: размеры заработной платы, пенсий и пособий, а также ставки некоторых налогов. Естественно, что в реальной жизни число управляющих параметров шире, к примеру, это могут быть методы не денежного стимулирования труда работников (похвальные грамоты, знаки отличия и т.д.), но их количественное измерение, а также степень влияния на мотивацию работников трудно формализуемо. Поэтому в предлагаемой методике предусматриваются только методы прямого монетарного воздействия на домашние хозяйства.

Далее формируется набор агентов микроуровня, в своей совокупности представляющих компоненты АОМ или «искусственное общество». Данное определение введено в русскоязычную литературу В.Л. Макаровым [16]. Более подробно процесс включения искусственных обществ в CGE модель описан ниже на конкретном примере.

Таким образом, экономическая система, реализованная в виде CGE модели, представляет собой макроуровень, определяющий поведение искусственных обществ, к примеру, в плане смены работы. В свою очередь, искусственные общества представляют микроуровень, на котором генерируемые людьми решения приводят к обратному воздействию на экономическую систему, которое выражается, к примеру, в изменении численности работников по отраслям экономики или в изменении спроса на какой-либо вид конечной продукции (рис. 1).

Воздействие на макроэкономическую систему извне, например, изменение налоговых ставок, затрагивает как напрямую агентов макроуровня, так и опосредовано членов искусственных обществ, которые, в свою очередь, могут оказать сильное обратное воздействие.

Следует упомянуть, что экспериментами по «скрещиванию» двух упомянутых инструментов для измерения экономических явлений занимается целый ряд ученых. Так, попытки объединить CGE и AOM предпринимались еще с 2000 года: в работах Д. Кокборна [4], Н. Аннаби [2] и Т. Рузерфорда [7] рассматривается соответственно 3373 домохозяйств Непала, 3278 домохозяйств Сенегала и 55 000 домохозяйств России.

Однако эти модели не являются ГАОМ, несмотря на включение в них данных по домохозяйствам, поскольку обработка домашними хозяйствами сигналов макроуровня происходит путем максимизации функции полезности домашнего хозяйства.

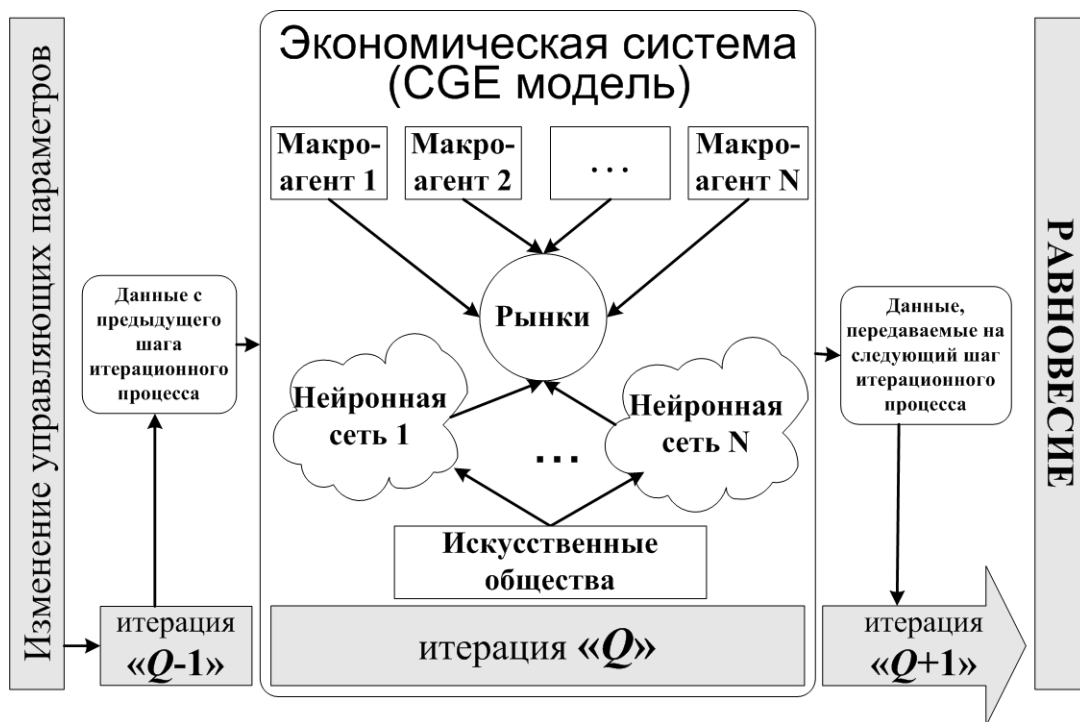


Рис. 1. Концептуальный взгляд на взаимодействие макро- и микроуровней в ГАОМ

В этой связи более правильным будет назвать перечисленные выше модели не ГАОМ, а CGE моделями с включенными микросимуляционными моделями. В зависимости от технологии объединения микро- и макроуровней такие модели можно классифицировать следующим образом.

1. CGE модели с *объединенным множеством домохозяйств* (Integrating Multiple Households, CGE-IMH). Отличительной особенностью этой группы моделей является включение максимально возможного числа домашних хозяйств, как правило,

соответствующего количеству опрошенных в ходе обследований национального статистического органа. К этой группе относятся перечисленные выше модели.

2. CGE модели, предусматривающие *последовательное микросимулирование* (Sequential Micro-Simulation, CGE-SMS). Сюда входят модели с несвязанными микро- и макроуровнями. Иными словами, сначала в рамках CGE модели рассчитываются параметры макроуровня, а затем после окончания пересчета эти данные подаются на вход в модель микроуровня. При этом обратной рекурсии не предусмотрено. Таким образом, эти в принципе слабо связанные между собой модели не гарантируют последовательность перехода между уровнями, поскольку по логике агенты микроуровня должны реагировать на изменения переменных среды ранее, чем будет достигнуто равновесие.

Место созданной в ходе исследования модели среди других разработок отображено на рис. 2.



Рис. 2. Место разработанных ГАОМ среди других моделей рассматриваемых классов

4. Краткое описание разработанной ГАОМ²

С помощью разработанной модели можно получить количественные оценки эффекта от воздействий на экономическую систему, выражающегося в изменении следующих основных показателей: 1) объема инвестиций в основные фонды предприятий государственной и

² Подробное описание модели приведено в книге А.Р. Бахтизина «Агент-ориентированные модели экономики» [9].

частной форм собственности, 2) ставок НДС, налога на прибыль предприятий и организаций, налога на имущество, налога на доходы физических лиц и ЕСН; 3) заработной платы работников предприятий государственной формы собственности; 4) ставок депозитов для предприятий и физических лиц; 5) объема социальных трансфертов домашним хозяйствам России (пенсии, пособия и т.д.); 6) объема денежной массы в экономике.

В процессе итеративного пересчета модели на рынке каждого товара и услуги уравниваются совокупный спрос и предложение в соответствии с двумя различными механизмами, применяемыми в зависимости от способа установления цены. Следует отметить, что в большинстве случаев единицами измерения цен являются их индексы относительно базового периода.

1. Механизм уравнивания на рынке с государственными ценами.

Предположим, что суммарный спрос на товар D_s^P не совпадает с суммарным предложением этого товара S_s^P . Т.е. имеет место неравенство $D_s^P > S_s^P$ либо $S_s^P > D_s^P$. Для устранения дисбаланса вводится поправочный коэффициент, называемый *индикатором дефицитности*, $I = S_s^P / D_s^P$, который умножается на величину спроса, корректируя ее на каждом шаге итерации. Как видно из формулы, индикатор дефицитности есть частное от деления предложения продукта на его спрос. В итерационном процессе индикатор дефицитности стремится к единице.

Поскольку в моделях в ряде случаев суммарный спрос D_s^P на товар есть сумма спросов нескольких агентов, то в реальности введенный коэффициент корректирует долю бюджета каждого агента, идущую на покупку соответствующего товара.

Предположим, что D_1^P – спрос агента 1, а D_2^P – спрос агента 2 на один и тот же товар по цене P . Спрос обоих агентов в модели определяется следующими соотношениями:

$$D_1^P = (O_1^P \cdot B_1) / P \text{ и } D_2^P = (O_2^P \cdot B_2) / P, \text{ где } O_1^P, O_2^P - \text{доли бюджетов } B_1, B_2 \text{ первого и}$$

второго агента соответственно. Для корректировки совокупного спроса доли O_1^P, O_2^P следует умножить на индикатор дефицитности I .

2. Рыночный и теневой механизмы уравнивания спроса и предложения.

Этот механизм стандартен и выглядит следующим образом:

$$P[Q+1] = P[Q] + \left(D_{s[Q]}^P - S_{s[Q]}^P \right) / C, \text{ где } P - \text{цена товара, } Q - \text{шаг итерации, а } C -$$

положительное число, называемое *константой итераций*. При его уменьшении экономическая система быстрее приходит в состояние равновесия, однако при этом увеличивается опасность ухода цены в отрицательную область.

Таким образом, в случае фиксированной (задаваемой экзогенно) цены на товар или услугу равновесие достигается посредством изменения доли бюджета, а в случае рыночной и теневой цены – за счет изменения самой цены.

Модель представлена семью экономическими агентами. Первые три из них являются агентами-производителями.

Экономический агент №1 – государственный сектор экономики. Сюда входят предприятия, доля государственной собственности в которых более 50 процентов.

Экономический агент №2 – рыночный сектор, состоящий из легально существующих предприятий и организаций с частной и смешанной формами собственности.

Экономический агент №3 – теневой сектор.

Экономический агент №4 – искусственные общества, представляющие совокупность людей, работающих на предприятиях государственной и частной форм собственности. Помимо этого, в модели рассматривается искусственное общество, состоящее из работников легально зарегистрированных предприятий, подрабатывающих на неофициальной работе.


Экономический агент №5 – правительство, представленное совокупностью федерального, региональных и местных правительств, а также внебюджетными фондами. Кроме того, в этот сектор входят некоммерческие организации, обслуживающие домашние хозяйства (политические партии, профсоюзы, общественные объединения и т.д.).


Экономический агент №6 – банковский сектор, включающий в себя Центральный банк России и коммерческие банки, действующие на территории России.

Экономический агент №7 – внешний мир. В данной версии модели все экономические показатели внешнего мира задаются экзогенно. Это значит, что все материальные и финансовые потоки определены для всех периодов времени, исходя из того или иного сценария взаимодействия отечественных производителей с производителями других стран.

На рис. 3 представлена укрупненная схема, отражающая работу модели в общем виде.

Обозначения схемы:

 – экономический агент;

 – рынок, на котором происходит торговля соответствующим товаром между рассматриваемыми в модели экономическими агентами.

c^1, c^2 и c^3 – рынки конечных товаров для искусственных обществ (домашних хозяйств) с государственными, рыночными и теневыми ценами соответственно;

g^1, g^2 – рынки конечных товаров для экономического агента №5 с государственными и рыночными ценами;

k^1, k^2 – рынки капитальных товаров с государственными и рыночными ценами;

i^1, i^2 – рынки инвестиционных товаров с государственными и рыночными ценами;

l^1, l^2, l^3 – рынки рабочей силы с государственными, рыночными и теневыми ценами;

ex – рынок экспортных товаров.

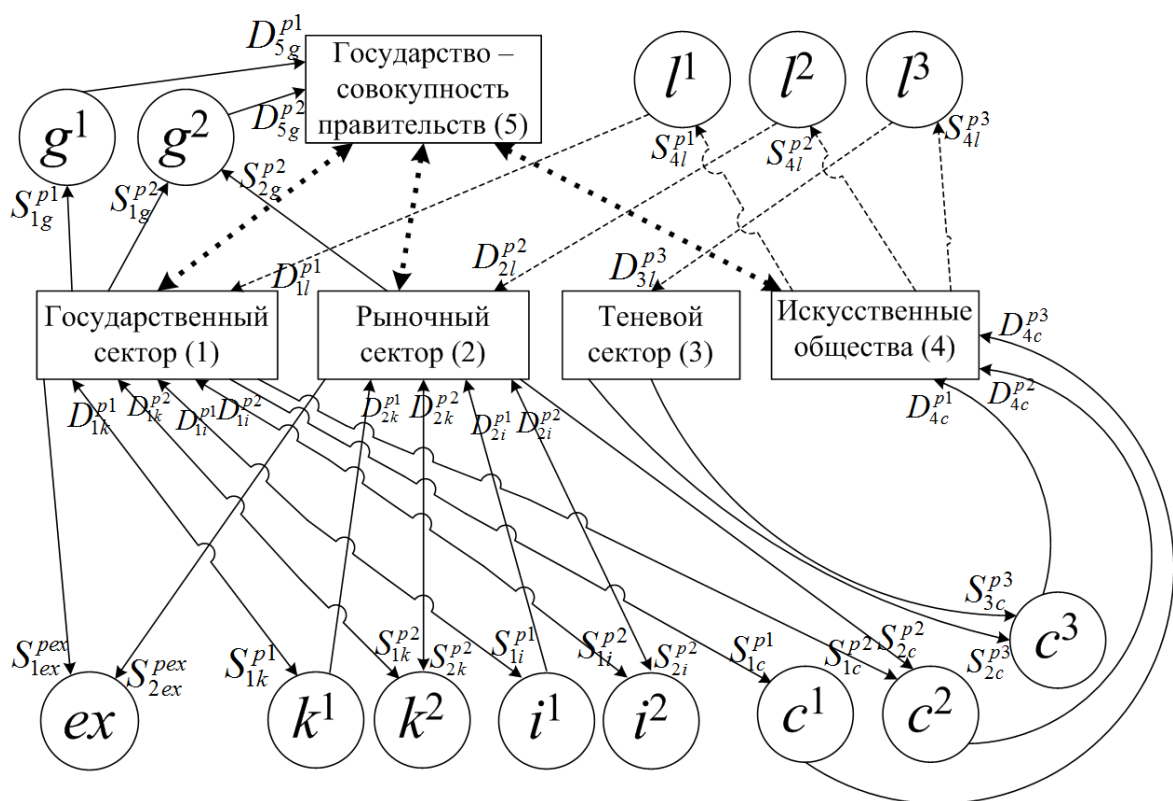


Рис. 3. Укрупненная схема взаимосвязей между основными компонентами ГАОМ

«Входящая» на рынок стрелка $\longrightarrow \bigcirc$ означает, что агент предлагает товар на рынке, а «исходящая» стрелка $\bigcirc \longrightarrow$, что агент покупает товар. Тонкая пунктирная стрелка $----- \blacktriangleright$ отражает действия агентов, связанные со спросом и предложением рабочей силы, а жирная пунктирная стрелка $----- \blacktriangleright$ – налоговые платежи и субсидии.

Согласно рис. 3, государственный и рыночный сектора производят продукт, распределяемый по четырем направлениям:

1) конечный продукт для искусственных обществ – домашних хозяйств (S_{1c}^{p1} , S_{1c}^{p2} и S_{2c}^{p2} , S_{2c}^{p3}), включающий в себя потребительские товары текущего потребления (продукты питания и т.д.), товары длительного потребления (бытовая техника, автомобили и т.д.), а также услуги;

2) конечный продукт для экономического агента №5 (S_{1g}^{p1} , S_{1g}^{p2} и S_{2g}^{p2}), состоящий из:

а) конечного продукта для государственных учреждений (по методологии СНС – расходы государственных учреждений на приобретение конечной продукции), включающего в себя:

- бесплатные услуги для населения, оказываемые предприятиями и организациями в области здравоохранения, образования и культуры;
- услуги, удовлетворяющие потребности общества в целом, т.е. общее государственное управление, охрана правопорядка, национальная оборона, нерыночная наука, жилищное хозяйство и т.д.;

б) конечного продукта для некоммерческих организаций, обслуживающих домашние хозяйства, включающего в себя бесплатные услуги социального характера;

3) инвестиционные товары – затраты на улучшение произведенных и произведенных материальных активов (иными словами, затраты на создание основного капитала) – S_{ii}^{p1} , S_{ii}^{p2}

и S_{2i}^{p2} . В этот товар не входят государственные (или правительственные) инвестиции, поскольку они учитываются в предыдущем виде товара. В соответствии с методологией СНС, этот вид товара определяется как сумма валового накопления основного капитала и изменения запасов материальных оборотных средств минус стоимость приобретенных новых и существующих основных фондов (за вычетом выбытия). Основные фонды в модели выделены в отдельный вид товара.

4) экспортные товары – S_{1ex}^{pex} , S_{2ex}^{pex} . Поскольку одной из составляющих рассмотренных ранее товаров являются импортные товары, то во избежание двойного счета, в экспортные товары входит только чистый экспорт (т.е. экспорт минус импорт);

Помимо произведенного продукта, государственный и рыночный сектора торгуют основными фондами (в модели это капитальные товары) – S_{1k}^{p1} , S_{1k}^{p2} и S_{2k}^{p2} .

Теневой сектор продает только один вид товара – конечный продукт для искусственных обществ (домашних хозяйств) – S_{3c}^{p3} . Этот экономический агент не платит налоги и не

получает субсидии. Для своего производства теневой сектор нанимает и оплачивает работников (членов искусственных обществ) – D_{3l}^{p3} .

Таким образом, всего в модели используется 5 видов товаров.

Для производства конечного продукта государственный и рыночный сектора покупают факторы производства:

- 1) рабочую силу – D_{1l}^{p1}, D_{2l}^{p2} ;
- 2) основные фонды – D_{1k}^{p1}, D_{1k}^{p2} и D_{2k}^{p1}, D_{2k}^{p2} ;
- 3) инвестиционные товары D_{1i}^{p1}, D_{1i}^{p2} и D_{2i}^{p1}, D_{2i}^{p2} .

Экономический агент №5 устанавливает налоговые ставки, определяет доли бюджета, идущие на субсидирование производителей и на социальные трансферты, а также расходует средства своего бюджета для покупки конечных товаров – D_{5g}^{p1}, D_{5g}^{p2} , произведенных государственным и рыночным секторами.

Банковский сектор определяет проценты для привлеченных депозитов и выпускает в обращение деньги.

Искусственные общества (домашние хозяйства) покупают конечные товары, производимые государственным, рыночным и теневым секторами – D_{4c}^{p1}, D_{4c}^{p2} и D_{4c}^{p3} . Кроме того, в рамках этого сектора определяется предложение рабочей силы для государственного, рыночного и теневого секторов – S_{4l}^{p1}, S_{4l}^{p2} и S_{4l}^{p3} . Опишем поведение искусственных обществ более подробно.

Агенты микроуровня - искусственные общества (домашние хозяйства).

Агрегированные метаданные.

В модели существуют следующие виды перетоков рабочей силы:

- 1) государственный сектор → рыночный сектор (доля L_1^2 от величины L_1);
- 2) рыночный сектор → государственный сектор (доля L_2^1 от величины L_2);
- 3) государственный и рыночный сектора → теневой сектор (доля L_{12}^3 от величины $L_1 + L_2$).

Эти доли определяются с помощью нейронных сетей. Об этом будет рассказано чуть позже.

Ниже представлены уравнения, определяющие баланс рабочей силы в разных секторах-производителях:

в государственном секторе:

$$L_1 = L_{1(t-1)} \left(1 - L_{1(t-1)}^2 + L_{1(t-1)}^a - L_{1(t-1)}^r \right) + L_{2(t-1)} \left(1 - L_{2(t-1)}^1 \right), \quad (1)$$

в рыночном секторе:

$$L_2 = L_{2(t-1)} \left(1 - L_{2(t-1)}^1 + L_{2(t-1)}^a - L_{2(t-1)}^r \right) + L_{1(t-1)} \left(1 - L_{1(t-1)}^2 \right), \quad (2)$$

в теновом секторе:

$$L_3 = (L_1 + L_2) \square L_{12}^3, \quad (3)$$

где L_1^a , L_1^r , L_2^a , L_2^r – доли прибывающих (к примеру, начавших свою трудовую деятельность в конкретном секторе) и выбывающих (к примеру, вышедших на пенсию) работников.

Бюджет искусственных обществ задается следующей формулой:

$$B_4 = B_4^b \left(1 + P_{b\%(t-1)}^h \right) + B_{4(t-1)} \left(1 - O_{4(t-1)}^s \right) + W_1 + W_2 + W_3 + G_4^{tr} + G_4^f + M_4. \quad (4)$$

Бюджет формируется из денег, отложенных на счетах в банках и остающихся с предыдущего периода нераспределенных наличных денег $B_{4(t-1)} \square O_{4(t-1)}^s$, заработной платы получаемой в государственном W_1 , рыночном W_2 и теновом секторах W_3 , а также пенсий, пособий и субсидий, получаемых из средств консолидированного бюджета и внебюджетных фондов G_4^{tr} , G_4^f . Помимо перечисленного, в модели учитывается эмиссия наличных денег M_4 .

Что касается остатка наличных средств, переходящих на следующий период, то динамика этого показателя следующая:

$$O_4^s = 1 - O_{4c}^{p1} - O_{4c}^{p2} - O_{4c}^{p3} - O_4^{tax} - O_4^b - O_4^{\$}. \quad (5)$$

Здесь учитываются расходы на конечные товары по государственным O_{4c}^{p1} , рыночным O_{4c}^{p2} и теновым O_{4c}^{p3} ценам, а также средства, идущие на покупку валюты $O_4^{\$}$, уплату налогов O_4^{tax} и на сбережения в банках O_4^b .

Доли бюджета O_{4c}^{p1} , O_{4c}^{p2} , O_{4c}^{p3} , $O_4^{\$}$ и O_4^b также определяются нейронными сетями.

Все перечисленные здесь доли бюджета участвуют в уравнениях, в которых формируется спрос на потребляемые продукты.

Теперь остановимся на используемых в модели нейронных сетях.

Для их обучения применялись данные реально проводимых опросов. Опишем вкратце процесс обработки социологических данных RLMS, используемых нами для обучения нейронных сетей.

RLMS – *The Russia Longitudinal Monitoring Survey* или Российский мониторинг экономического положения и здоровья населения (РМЭЗ) представляет собой серию проводившихся в Российской Федерации репрезентативных общенациональных опросов.

Каждое обследование представляет собой ответы на более чем 3 тысячи вопросов, сгруппированных по трем вопросникам с информацией по нескольким разделам:

- 1) вопросник для взрослых (разделы: *миграция, работа, медицинское обслуживание, оценка здоровья, бюджет времени*);
- 2) вопросник для детей (разделы: *уход за детьми, медицинское обслуживание, оценка здоровья, бюджет времени*);
- 3) семейный вопросник (разделы: *информация о семье, жилищные условия, земледелие и животноводство, расходы, доходы*).

В среднем, в каждой волне опрашивалось около 10 000 взрослых, 2 000 детей (суммарно 4 000 домохозяйств). Уникальность этого исследования заключается в том, что интервьюеры старались учесть всех людей участвовавших в исследовании ранее и, если кто-то из прежних респондентов переезжал, то их опрашивали по новым адресам. Таким образом, благодаря проведенным в рамках каждой волны обследованиям можно проследить поведение индивидов и домохозяйств в динамике.

При разработке моделей в данном исследовании использовались данные второго этапа мониторинга, поскольку на первом этапе RLMS применялась другая репрезентативная выборка.

В модель включены пять нейронных сетей, три из которых определяют поведение человека в плане смены работы, а остальные две связаны со способом распределения бюджета домохозяйства.

Первая нейронная сеть определяет миграцию трудовых ресурсов государственного сектора, т.е. количество работников государственного сектора, переходящих в рыночный сектор.

Для построения этой сети использовались анкеты для взрослых, из которых были отобраны вопросы, относительно работы респондентов. Полученный массив данных обрабатывался следующим образом:

- *Этап 1.* Отбирались только те индивиды, которые участвовали во всех волнах обследований (для того, чтобы проследить поведение человека во времени).

- *Этап 2.* Отбирались только те, у кого есть работа. Среди них отбирались респонденты, указавшие свою зарплату, а уже среди последних отбирались ответившие на вопрос о том, какая форма собственности у предприятия-работодателя.

- *Этап 3.* В каждую волну обследований была включена новая переменная Z_1^j , представляющая собой частное от деления индекса номинальной заработной платы каждого респондента и индекса потребительских цен. На данном этапе обработки массив данных представлял собой таблицу, столбцами которой являются упомянутые выше переменные, повторяющиеся по годам, а строками – наблюдения.

- *Этап 4.* Для обучения нейронной сети необходимы только две переменные: 1) Z_1^j и 2) индикатор, отражающий форму собственности предприятия-работодателя в момент времени $t+1$ при условии, что в момент времени t человек работал в государственном секторе. Этот индикатор принимает два значения: «1» – работник остался в государственном секторе, «2» – работник перешел в рыночный сектор. Поскольку остальные переменные массива к данному этапу были уже обработаны и далее не использовались, они были удалены. Две оставшиеся переменные были «склеены» в массив из двух переменных, содержащий 1097 наблюдений для непосредственного обучения нейронной сети.

- *Этап 5.* На данном этапе была введена в рассмотрение еще одна переменная V_1^j , показывающая различие между переменной Z_1^j для отдельно взятого работника и переменной Z_1 «совокупного работника»:

$$V_1^j = Z_1^j / Z_1, \quad (6)$$

где Z_1 – частное от деления индекса номинальной заработной платы «совокупного работника» государственного сектора и индекса потребительских цен.

Для обучения нейронной сети переменная (6) не потребуется, однако она нужна для встраивания сети в модель.

Результатом последнего этапа обработки данных для данного исследования стал массив из двух переменных, содержащий 1097 наблюдений. В некоторых случаях значения переменной Z_1^j были слишком большими, что сделало необходимым очистить массив данных от подобных выбросов, в результате чего окончательное число наблюдений стало равным 839.

Таким образом, первая нейронная сеть была обучена на 839 наблюдениях.

Включение нейронной сети в ГАОМ.

Все наблюдения, которые использовались для обучения нейронной сети, в ГАОМ интерпретируются как 839 человек искусственного общества, принимающие решение о переходе в рыночный сектор или о продолжении работы в государственном секторе. Это решение базируется на размышлении о целесообразности дальнейшей работы в секторе, исходя из изменения своей покупательной способности. Иными словами в процессе работы ГАОМ каждому члену искусственного общества подается следующая информация (входная переменная нейронной сети):

$$U_1^j = Z_1 \square V_1^j, \quad (7)$$

где V_1^j – константа «различия людей», рассчитанная ранее по формуле (6), а Z_1 – общая для всех работников переменная, изменяющаяся в процессе итеративного пересчета.

Остановимся теперь на выходной переменной нейронной сети. В соответствии с выбранной топологией нейронной сети и функцией активации ее нейронов, для вычисления выходной переменной используется следующая формула:

$$N_1^j = \frac{\sum_{k=1}^{10} \tau_1^k + e \left(\sum_{k=1}^j r_{(1)scale}^{in} - \sum_{k=1}^{2k} \tau_1^{2k} + \sum_{k=1}^{3k} w_1^{3k} \tau_1^3 - r_{(1)shift}^{out} \right)}{r_{(1)scale}^{out}}, \quad (8)$$

где $r_{(1)scale}^{in}$, $r_{(1)shift}^{in}$, τ_1^{2k} , τ_1^3 , w_1^{2k} , w_1^{3k} , $r_{(1)scale}^{out}$, $r_{(1)shift}^{out}$ – технические переменные сети, определяемые программным пакетом.

Естественно, что нейронная сеть не выдает значения в точности равные «1» или «2», в связи с чем, в модели они округляются до ближайшего целого. Таким образом, выходная переменная сети N_1^j преобразуется следующим образом:

$$N_1^j = \begin{cases} 1; & 1,5 \square N_1^j < 2,5 \\ 0; & 0,5 < N_1^j < 1,5 \end{cases} \quad (9)$$

Такое преобразование необходимо для вычисления доли работников от их общего количества L_1 , перешедших в рыночный сектор:

$$L_1^2 = \sum_{j=1}^{89} N_1^j / 839. \quad (10)$$

Полученная таким образом доля используется в уравнениях (1) – (2). По тому же принципу строились и остальные нейронные сети.

Вторая нейронная сеть определяет миграцию трудовых ресурсов рыночного сектора, т.е. количество работников рыночного сектора, переходящих в государственный сектор. Аналогично предыдущему случаю, в конечном итоге рассчитывается доля L_2^1 от величины L_2 .

Третья нейронная сеть характеризует относительные масштабы теневого сектора в сфере трудовых ресурсов, т.е. количество работников государственного и рыночного секторов, работающих в теневом секторе. В конечном счете, так же как и в предыдущих случаях, рассчитывается доля L_{12}^3 от величины $(L_1 + L_2)$.

Полученные с помощью нейронных сетей доли использовались в уравнениях (1) – (3).

Четвертая и пятая нейронные сети характеризуют структуру распределения бюджета, т.е. определяют доли бюджета совокупного потребителя O_{4c}^{p1} , O_{4c}^{p2} и O_{4c}^{p3} , идущие на покупку конечных товаров соответственно по государственным, рыночным и теневым ценам, а также доли бюджета O_4^s , O_4^b , идущие на покупку валюты и на вклады в банках. Эти сети строились по похожему принципу, однако для их обучения использовались семейные вопросники, из которых были отобраны вопросы, конкретизирующие расходы домашних хозяйств на конечные товары, покупку валюты и сбережения.

Заключение

В статье был предложен методический подход к разработке ГАОМ, включающий в себя следующие основные этапы:

- формулировка цели моделирования поведения домашних хозяйств;
- проведение специального социологического обследования для получения массива данных относительно реакции объектов микроуровня (в рамках обозначенной цели) на изменение макроэкономической ситуации, либо использование существующих баз данных мониторингов экономического положения населения России (например, RLMS или NOBUS) в случае достаточности приведенных в них данных;
- спецификация поведения агентов микроуровня в ГАОМ посредством построения соответствующих нейронных сетей;
- формирование набора агентов микроуровня, в своей совокупности представляющих компоненты агент-ориентированной модели или «искусственное общество»;
- реализация экономической системы в виде CGE модели макроуровня, определяющего «среду функционирования» искусственных обществ.

На основе разработанной методологии была построена ГАОМ социально-экономической системы России, отражающая хозяйствующие субъекты макроуровня, сгруппированные по формам собственности и совокупность агентов микроуровня – индивидов, принимающих решение о поиске работы;

С помощью разработанной ГАОМ были проведены вычислительные эксперименты, подробное описание которых приведено в книге «Агент-ориентированные модели экономики» [9]. В частности, были рассчитаны последствия изменений ставок основных налогов на количество работников, задействованных в теневом секторе. Помимо этого, были симулированы некоторые эффекты коррупции и теневой экономики, а также рассчитана эффективность дополнительного инвестирования предприятий реального сектора экономики за счет средств государственного внебюджетного инвестиционно-кредитного фонда.

Литература

1. Alekseev A., Tourdyeva N., Yudaeva K. (2003): Estimation of the Russia Trade Policy with the Help of the Computable General Equilibrium Model. CEFIR Academic papers.
2. Annabi N., Cisse F., Cockburn J. and Decaluwe B. (2005): Trade Liberalization, Growth and Poverty in Senegal: A Dynamic Microsimulation CGE Model Analysis, CIRPEE Working Paper No. 05-12, May 2005.
3. Bonabeau Eric (2002): Agent-based modeling: methods and techniques for simulating human systems. Proc. National Academy of Sciences 99(3): 7280-7287.
4. Cockburn J (2001): Trade Liberalization and Poverty in Nepal: A Computable General Equilibrium Micro Simulation Analysis / Discussion paper 01-18, Centre for the Study of African Economies and Nuffield College (Oxford University), October 2001.
5. Epstein Joshua M. (2005): Remarks on the foundations of agent-based generative social science. Handbook on Computational Economics, Volume II, K. Judd and L. Tesfatsion, eds. North Holland Press.
6. Parker Jon (2007): A Flexible, Large-Scale, Distributed Agent Based Epidemic Model. CSED Working Paper No. 52.
7. Rutherford T., Shepotylo O., Tarr D. (2005): Poverty Effects of Russia's WTO Accession: Modeling «Real» Households and Endogenous Productivity Effects. / WTO Bank Policy Research Working Paper No. 3473, January 2005.
8. Бахтизин А.Р. (2003): Вычислимая модель «Россия: Центр – Федеральные округа». Препринт # WP/2003/151. М.: ЦЭМИ РАН.
9. Бахтизин А.Р. (2008): Агент-ориентированные модели экономики. М.: Экономика, 2008.

10. Бахтизина Н.В. (2003): CGE модель конкурирующих партий России // Материалы IV всероссийского симпозиума «Стратегическое планирование и развитие предприятий». М.: ЦЭМИ РАН.
11. Бекларян Г.Л. (2002): Анализ эффективности экономической политики России с помощью вычислимой модели общего равновесия, описывающей взаимодействие совокупного потребителя, совокупного производителя и государства. Препринт # WP/2002/143. М.: ЦЭМИ РАН.
12. Бесстремьянная Г.Е., Бахтизин А.Р. (2004): Вычислимая модель «Социальная Россия». Препринт # WP/2004/173. М.: ЦЭМИ РАН.
13. Борщев А.В. Практическое агентное моделирование и его место в арсенале аналитика Exponenta PRO, #3-4 (7-8), 2004.
14. Карпов Ю. (2006): Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5. СПб.: БХВ-Петербург.
15. Макаров В.Л. (1999): Вычислимая модель российской экономики (RUSEC). Препринт # WP/99/069. М.: ЦЭМИ РАН.
16. Макаров В.Л. Искусственные общества / Искусственные общества. 2006. Т. 1. № 1. М: ЦЭМИ РАН, 2006.
17. Макаров В.Л., Бахтизин А.Р. (2001): Эффективный способ оценки государственной политики // Экономика и управление. № 4.
18. Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Бахтизина Н.В. (2005): CGE модель социально-экономической системы России со встроенными нейронными сетями. М.: ЦЭМИ РАН.
19. Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Сулакшин С.С. (2007): Применение вычислимых моделей в государственном управлении. М.: Научный эксперт, 2007.
20. Макаров В.Л., Бахтизин А.Р. Новый инструментарий в общественных науках – агент-ориентированные модели: общее описание и конкретные примеры / «Экономика и управление», № 12 (50), 2009 г.
21. Макаров В.Л., Житков В.А., Бахтизин А.Р. Регулирование транспортных потоков в городе – проблемы и решения. Экономика мегаполисов и регионов, № 3 (27), 2009.
22. Паринов С.И. Новые возможности имитационного моделирования социально-экономических систем. Искусственные сообщества. 2007. №3-4.