

Макаров В. Л., Бахтизин А. Р.

Современные методы прогнозирования последствий управленческих решений*

Макаров Валерий Леонидович

Центральный экономико-математический институт РАН (Москва)

Директор

Доктор физико-математических наук, академик РАН, президент Российской экономической школы, директор

Высшей школы государственного администрирования МГУ имени М. В. Ломоносова

makarov@cemi.rssi.ru

Бахтизин Альберт Рауфович

Центральный экономико-математический институт РАН (Москва)

Заведующий лабораторией компьютерного моделирования социально-экономических процессов

Ведущий научный сотрудник Института законодательства и сравнительного правоведения при Правительстве РФ

Доктор экономических наук

albert.bakhtizin@gmail.com

РЕФЕРАТ

В статье дается общее представление о новых инструментах для количественной оценки последствий некоторых управленческих решений, оказывающих влияние на социально-экономические показатели рассматриваемой территории (муниципального образования, субъекта РФ или всей страны).

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

компьютерное моделирование, вычислимые модели общего равновесия, агент-ориентированные модели

Makarov V. L., Bakhtizin A. R.

Modern Methods of Forecasting of Consequences of Administrative Decisions

Makarov Valery Leonidovich

Russian Academy of Sciences, Central Economic-Mathematical Institute (Moscow, Russian Federation)

Director

Doctor of Science (Physics and Mathematics), Academician of the Russian Academy of Sciences, President of the

New Economic School, Director of the Graduate School of Public Administration Lomonosov Moscow State

University

makarov@cemi.rssi.ru

Bakhtizin Albert Raufovich

Russian Academy of Sciences, Central Economic-Mathematical Institute (Moscow, Russian Federation)

Head of the Laboratory of Computer Modeling of Social and Economic Processes

Leading Researcher of the Institute of Legislation and Comparative Law under the Government of the Russian Federation

Doctor of Science (Economics)

albert.bakhtizin@gmail.com

ABSTRACT

In the article, it is adumbrated about new tools for a quantitative assessment of consequences of some administrative decisions having impact on social and economic indexes of the considered territory (municipality, the territorial subject of the Russian Federation or all country).

KEYWORDS

computer modeling, computable models of the general balance, the agent — the focused models

* Работа выполнена при поддержке грантов РГНФ № 14-02-00431 и № 15-02-00276.

В настоящее время используются три основных подхода к оценке последствий управленческих решений: 1) качественное описание возможных сценариев развития исследуемых объектов; 2) построение математических моделей с использованием различных методологий; 3) нормативный подход, предусматривающий установку целевых показателей и определение путей их достижения.

Математический инструментарий прогнозирования включает в себя широкий перечень различных подходов. Среди всего многообразия мы выделяем и рассматриваем ниже вычислимые модели общего равновесия и агент-ориентированные модели.

I. Вычислимые модели общего равновесия

Вычислимые модели общего равновесия, известные в зарубежной литературе как Computable General Equilibrium models (CGE models), относятся к одним из самых перспективных инструментов количественной оценки действий макроагентов. Это новое направление в прикладной экономике, позволяющее найти подходы к решению широкого круга задач, относящихся в основном к государственному регулированию экономики, сформировалось и получило широкое распространение во всем мире благодаря появлению компьютеров. Необходимо отметить, что долгое время в нашей стране CGE-моделям не уделялось должного внимания.

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 рынках товаров и услуг, рассматриваемых в модели. 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*.

Термин «равновесные» не должен смущать на том основании, что реальные состояния экономики могут быть далеки от равновесия. Сама технология вычислений позволяет моделировать — в частности, имитировать — сам процесс движения к равновесию. И если реальные цены, к примеру, неравновесны, то упомянутая технология позволяет выявить, почему это происходит и как далеко еще до равновесия.

Считается, что первая CGE-модель была разработана шведским экономистом Л. Иохансеном [9], хотя в более широком понимании CGE-моделирование берет свое начало с модели затрат — выпуска, разработанной В. Леонтьевым. Модель Иохансена состояла из 20 секторов — отраслей промышленности и еще одного сектора, включающего в себя домашние хозяйства. Важную роль в этой модели играли цены, определяющие стратегии действий секторов, входящих в модель, при этом использовался стандартный рыночный механизм ценообразования. После довольно продолжительной паузы в развитии CGE-моделирования произошедшие в 1973 г. изменения мировых цен на нефть вновь стимулировали интерес к CGE-подходу. Кроме того, этому способствовало появление компьютерных программ,

позволяющих проводить численные эксперименты с CGE-моделями. На данном этапе CGE-моделирование стало обширным полем исследований для прикладных экономистов, причем CGE-модели используются в основном для решения задач, относящихся к получению количественной оценки действий правительства, например, изменений налоговых ставок, оказывающих влияние на общую экономическую ситуацию [6].

На основе анализа существующих CGE-моделей их можно условно разделить на две основные группы в соответствии с их историческим развитием и целями создания.

Первая группа моделей сформировалась на основе Леонтьевской модели затрат — выпуска и экономических моделей краткосрочного периода, широко используемых начиная с 1930-х гг. Задачи, решаемые с помощью моделей этой группы, в основном сводятся к получению количественной оценки последствий распределения дохода, полученного в краткосрочном периоде, а также к оценке результатов экономического роста отраслей народного хозяйства. Упомянутую выше модель Иохансена, находящую значения эндогенных переменных и цен с учетом перераспределения труда и капитала по секторам в одном временном промежутке, принято считать первой моделью этой группы. В настоящее время эти макромоделли стали особенно популярны для анализа политики в развивающихся странах. Наиболее известным на сегодняшний день автором в этой области CGE-моделирования является американский экономист Л. Тэйлор [13].

Во вторую группу CGE-моделей входят модели вальрасовского типа, или вальрасовские CGE-модели, представляющие собой практическую реализацию известной модели общего экономического равновесия Л. Вальраса. CGE-модели вальрасовского типа получили распространение после работы А. Харбергера [8], в которой он оценивал эффект от налогообложения в двухсекторной модели. Кроме того, существенное влияние на развитие этого типа CGE-моделей оказала работа Г. Скарфа [12], описывающая алгоритм численного разрешения системы уравнений Вальраса.

Основная цель вальрасовского CGE-анализа состоит в получении количественной оценки последствий изменений экзогенных переменных модели на распределение ресурсов и экономическое благосостояние. Особое внимание в моделях вальрасовского типа уделяется результатам налоговой политики и политики в области международной торговли [10]. В то же время нельзя не отметить, что в течение последнего десятилетия при разработках CGE-моделей вальрасовского типа наблюдается отклонение от теории общего равновесия Вальраса с целью получения более реалистичной модели экономики. В качестве примера можно привести модель Фельтенштейна и Шаха, включающую в себя финансовые рынки [7]. Основная идея, лежащая в основе их работы, состоит в преобразовании модели общего равновесия Вальраса из абстрактного описания экономики в реалистическую экономическую модель.

Альтернативой приведенной выше классификации может послужить классификация CGE-моделей по способу оценивания параметров, входящих в модель, оцениваемых либо с помощью процедуры калибровки, когда параметры калибруются так, чтобы значения эндогенных переменных в модели совпадали со статистическими значениями либо с помощью эконометрических методов оценки параметров модели.

Другому способу деления CGE-моделей посвящено исследование нидерландского ученого М. Тишена [14]. Данный подход основывается на принадлежности теоретической базы CGE-модели к какой-либо из существующих экономических школ (кейнсианской, некейнсианской, неоклассической и т. д.).

Обычно в качестве базы данных для создания CGE-моделей используют матрицу финансовых потоков (известную в иностранной литературе как Social Accounting

Matrix, или SAM), показывающую балансы расходов и доходов основных экономических агентов в базисном году. По своей сути SAM является расширением леонтьевской таблицы межотраслевого баланса путем добавления в нее финансовых результатов других экономических агентов — потребителей и правительств.

Преимущества CGE-моделей

По сравнению с эконометрическими моделями — наиболее часто используемым средством измерения реакции экономических объектов — CGE-модели являются более совершенным инструментом исследования экономики.

Отдельные эконометрические уравнения хотя и дают представление о влиянии того или иного фактора на отслеживаемый показатель, но не позволяют в полной мере оценить мультипликативный эффект от влияния оцениваемого фактора. К примеру, цена ресурса А может сильно влиять на издержки отрасли В, но в то же время цена продукта отрасли В может также влиять на издержки отрасли, производящей продукт А. В силу того что эконометрическое уравнение не является итерационной моделью, позволяющей отслеживать обоюдное влияние различных отраслей, с помощью этого инструмента мы не можем проследить результаты описанного выше межотраслевого взаимодействия до некоторой точки логического останова (к примеру, достижения равновесия спроса и предложения на рынках товаров А и В).

В то же время в CGE-моделях пересчет уравнений продолжается до четко определенного момента — совпадения совокупного спроса и предложения на рынках всех товаров и факторов производства, рассматриваемых в модели (об этом уже говорилось выше).

Логичнее включать регрессионные уравнения в состав CGE-моделей. К примеру, можно статистически оценить эластичности изменения долей бюджета агентов или долей распределения готового продукта по направлениям использования для лучшей спецификации соответствующих уравнений.

Далее посредством эконометрического подхода к моделированию экономических систем можно получать хорошие результаты только в том случае, когда экономика страны развивается равномерно, без резких спадов и подъемов, т. е. они могут не дать правдивых оценок в случае экономических шоков. Кроме того, при составлении эконометрических зависимостей необходимы достаточно длинные ряды статистических данных, которых зачастую нет.

При разработке CGE-моделей необязательно иметь все статистические данные, поскольку часть из них можно получить эмпирическим путем (в процессе калибровки модели).

Таким образом, CGE-подход благодаря своей гибкой форме может с успехом заменить другие экономико-математические модели во многих областях исследований.

Ниже приведено концептуальное описание работы типовой CGE-модели, являющейся частным случаем равновесных моделей.

CGE-модель, как правило, включает 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. К примеру, в ЦЭМИ РАН разработана CGE-модель экономики знаний, где в число аргументов производственной функции входят затраты секторов на инновационную продукцию, обучение сотрудников и результаты НИОКР [1].

Вид производственных функций для каждой модели также индивидуален, но чаще всего это модифицированные функции Кобба—Дугласа: $Y = A \cdot K^{\alpha} \cdot L^{\beta} \cdot Z^{\gamma}$, где

K , L и Z — основные фонды, рабочая сила и промежуточная продукция соответственно, 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: $P[Q + 1] = P[Q] + (D_{s[Q]}^p - S_{s[Q]}^p) / C$, где Q — шаг итерации, C — константа, влияющая на скорость сходимости модели (подробнее об этом см. ниже).

Используемые для описания CGE-моделей переменные имеют одинаковую структуру, приведенную на схеме, объясняющей индексацию переменных (рис. 1).

Символ X означает действие, осуществляемое агентом. Примером такого действия могут быть S — предложение товара, D — спрос на товар, O — определение агентом доли бюджета, идущей на то или иное направление, и т. д. Как правило, из контекста понятно, о каком действии идет речь.

Индекс m определяет рынок, на котором агент осуществляет свои действия. Этот индекс присутствует только у переменных, имеющих отношение к торговле. Номер экономического агента в большинстве случаев задается индексом i . И наконец, p — это индекс, означающий, что переменная имеет отношение к продаже или покупке товара по цене P_j . Некоторые переменные содержат только часть перечисленных здесь индексов.

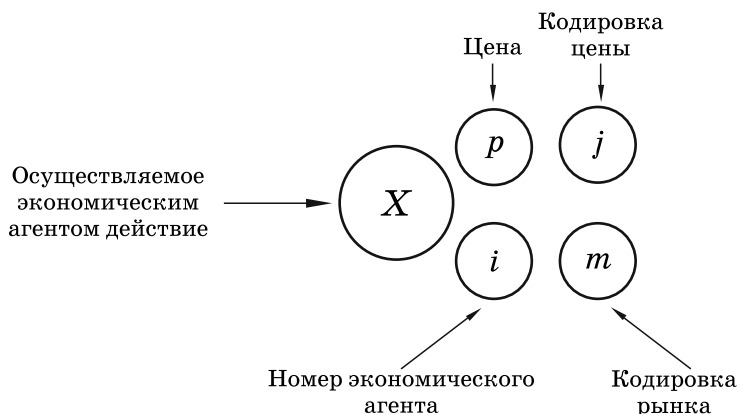


Рис. 1. Обозначение переменных в модели

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. 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, 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: $D_1^p = (O_1^p \cdot B_1) / P$ и $D_2^p = (O_2^p \cdot B_2) / P$, где O_1^p , O_2^p — доли бюджетов B_1 , B_2 агентов 1 и 2 соответственно. Для корректировки совокупного спроса доли O_1^p , O_2^p следует умножить на индикатор дефицитности I .

2. Рыночный и теневой механизм уравнивания спроса и предложения

Этот механизм стандартен и выглядит следующим образом: $P[Q + 1] = P[Q] + (D_{s[Q]}^p - S_{s[Q]}^p) / C$, где P — цена товара, Q — 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.

В CGE-моделях, разработанных за рубежом, механизм уравнивания спроса и предложения с помощью изменений доли бюджета не используется. Поэтому такие модели более ограничены. В них не может быть адекватно представлен механизм ценообразования для продуктов и услуг, при котором происходит рационирование.

При проведении вычислительных экспериментов мы меняем один или несколько экзогенных параметров и запускаем модель на пересчет.

Пересчет уравнений модели происходит до совпадения совокупного спроса и предложения на рынке каждого товара и услуги, рассматриваемых в модели, посредством итерационного процесса с помощью соответствующих прикладных пакетов.

На каждой итерации происходит корректировка долей бюджета экономических агентов (в случае государственной цены) или изменение цены (в случае рыночного или теневого механизма уравнивания спроса и предложения).

Более подробно процесс вычислений выглядит следующим образом. Допустим, что мы изменили долю бюджета агента-производителя, идущую на покупку какого-либо фактора производства. Что мы получаем дальше? При «запуске» модели на пересчет на следующей итерации меняется спрос агента на данный вид фактора производства. Соответственно нарушается баланс спроса и предложения на этом рынке, в результате чего получается новая равновесная цена. Одновременно с этим меняется бюджет агента, поскольку теперь изменилась сумма потраченных средств

на покупку фактора производства и, как следствие, в следующий момент времени он стал располагать большими (или меньшими) средствами для покупки всего остального. Соответственно возникает дисбаланс на других товарных рынках. Однако это далеко не все, поскольку изменившаяся ситуация на рынках затрагивает других участников экономической системы и приводит к пересмотру их поведенческой стратегии. Таким образом, мы имеем целое дерево изменений абсолютно всех эндогенных параметров модели (рис. 2) с обратной рекурсией.

Другим важным аспектом проведения экспериментов является то, насколько сильно мы изменили экзогенный параметр (или параметры) модели, т. е. насколько сильный шок испытала экономическая система.

Это обстоятельство можно проиллюстрировать следующим образом (рис. 3). Чем сильнее вмешательство извне, тем больший дисбаланс вносится в начальный момент времени на рассматриваемые в модели рынки и тем дольше будет происходить поиск равновесия. Поиск баланса между скоростью расчетов и их безопасностью (в плане недопустимости ухода цен в область отрицательных значений) также имеет большое значение.

За период с 2002 по 2015 г. в ЦЭМИ РАН были разработаны несколько CGE-моделей:

- CGE-модель «RUSEC — Газпром». Модель представлена тремя экономическими агентами: газовая отрасль, интегрированное домашнее хозяйство и интегрированные в одно предприятие остальные отрасли экономики.
- CGE-модель «Россия: Центр — Федеральные округа». Модель представлена семью федеральными округами 1) Центральный федеральный округ; 2) Северо-Западный федеральный округ; 3) Южный федеральный округ; 4) Приволжский федеральный округ; 5) Уральский федеральный округ; 6) Сибирский федеральный округ; 7) Дальневосточный федеральный округ. Кроме того, в модели присутствует общая для всех федеральных округов часть, содержащая в себе интегральные показатели для экономики всей России, получающиеся путем суммирования основных макропоказателей федеральных округов, входящих в модель. Все макропоказатели, участвующие в модели, являются результатом деятельности экономических агентов, присутствующих в каждом из федеральных округов. В существующей версии модели экономических агентов в каждом федеральном округе четыре.
- CGE-модель «RUSEC — Естественные монополии». В модели участвуют семь экономических агентов: РАО ЕЭС, ОАО «ГАЗПРОМ», угольная отрасль, нефтедобывающая отрасль, нефтеперерабатывающая отрасль, интегрированное домашнее хозяйство и интегрированные в одно предприятие остальные отрасли экономики.
- CGE-модель «Социальная Россия». Эта модель представлена пятью экономическими агентами (государственный, рыночный и теневой сектора экономики, совокупное правительство и совокупный потребитель) и тремя отраслями (производство агрегированного потребительского блага — «другие товары и услуги», отрасли здравоохранения и образования). Основными параметрами модели являются промежуточные и конечные продукты, труд, капитал (основные фонды), цены на товары и факторы производства, налоговые ставки, статьи расходов и доходов консолидированного бюджета и внебюджетных фондов, а также макроэкономические показатели (ВВП, валовой выпуск, доходы и расходы потребителей). В модели рассматриваются четыре вида рынков с государственными, рыночными и теневыми ценами: 1) рынок труда; 2) рынок капитала; 3) рынок промежуточных продуктов; 4) рынок конечных продуктов.
- CGE-модель социально-экономической системы России со встроенными нейронными сетями. В этой модели (в отличие от других) поведение домашних хозяйств России определяется с помощью нейронных сетей — наиболее популярного аппа-

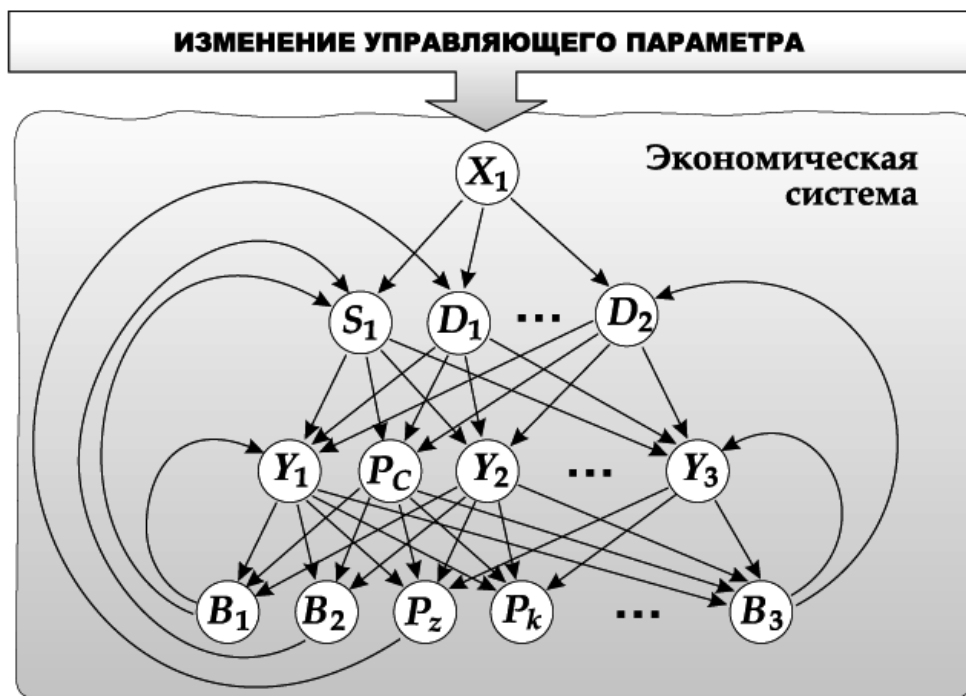


Рис. 2. Последовательность изменения эндогенных параметров модели (концептуальный взгляд) и обратная рекурсия

рата в области моделирования искусственного интеллекта. Таким образом была предпринята попытка моделирования ограниченной рациональности (bounded rationality) поведения домашних хозяйств. Модель представлена семью экономическими агентами, первые три из которых являются агентами-производителями.

- CGE-модель финансовой системы Российской Федерации, позволяющая провести количественную оценку последствий следующих незаконных финансовых операций на основные макроэкономические показатели:
 - ♦ уклонение от уплаты налогов физическими и юридическими лицами;
 - ♦ вывод активов за рубеж;
 - ♦ изъятие бюджетных средств и средств юридических лиц (имитация коррупционных схем).

II. Агент-ориентированные модели

Агент-ориентированные модели (АОМ) относятся к классу моделей, основанных на индивидуальном поведении агентов и создаваемых для компьютерных симуляций. Основная идея, лежащая в основе АОМ, заключается в построении вычислительного инструмента, представляющего собой совокупность агентов с определенным набором свойств и позволяющего проводить симуляции реальных явлений. При этом сами модели, используя простые правила поведения агентов, могут выдавать весьма интересные результаты.

АОМ — это модель, обладающая следующими основными свойствами.

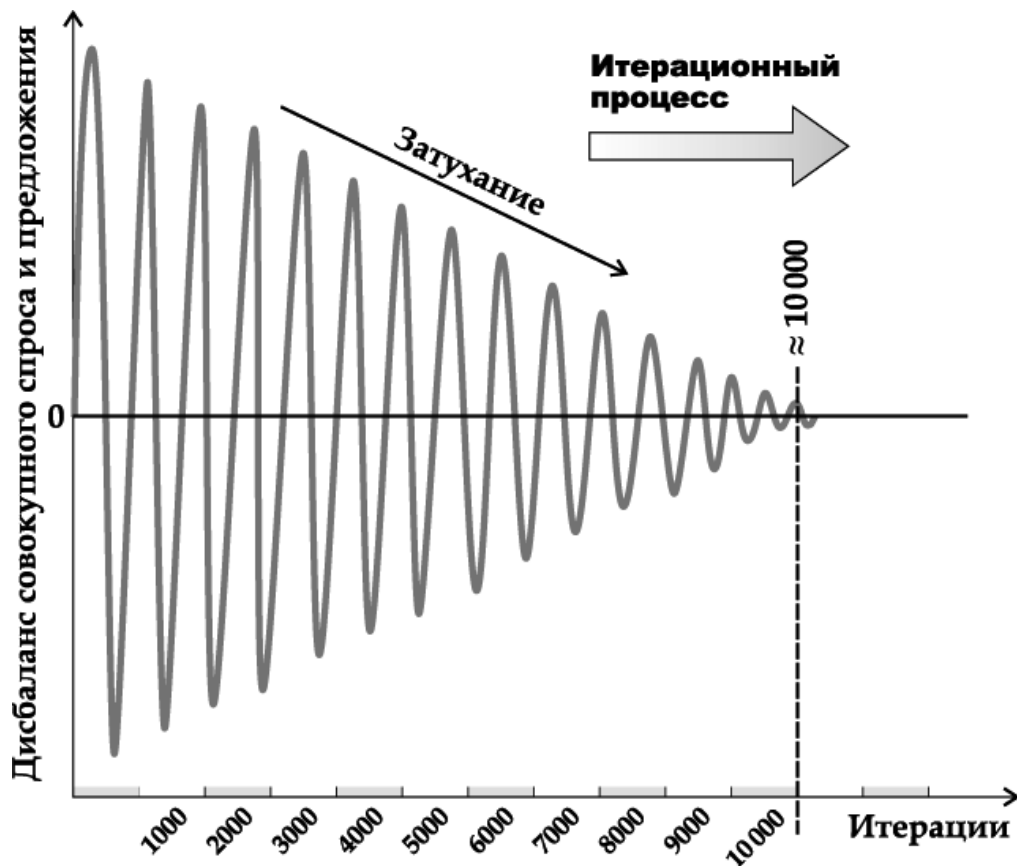


Рис. 3. Процесс затухающих флуктуаций при пересчете моделей

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.

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 [11]). Обычно в моделях социально-экономических систем присутствуют агрегированные агенты, представляющие собой либо отрасль, либо регион, либо совокупное домохозяйство. При этом спецификация агента происходит за счет оптимизации соответствующей функции полезности или же в модель включаются рассчитанные ранее экзогенные параметры, отражающие результаты решений агента. В литературе эти два подхода часто подвергаются обоснованной критике, поскольку в большинстве случаев они не всегда позволяют получить в рамках таких моделей реалистичные оценки взаимодействия агрегированных агентов. В то же время, за счет более детальной спецификации в АОМ агентов микроуровня можно сделать изменения параметров макроуровня более адекватными действительности.

Агентное моделирование дополняет традиционные аналитические методы, а также включает в себя различные подходы имитационного моделирования (системную динамику и дискретно-событийное моделирование), поскольку последние могут применяться «внутри» агентной модели при формализации ее отдельных активных объектов или агентов [4]. 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 образование, состоящее из взаимодействующих между собой самостоятельных агентов, причем важная особенность мультиагентных моделей заключается в том, что конкретные значения характеристик агентов различаются, поэтому полученная структура состоит из похожих, но не одинаковых членов. А возможности современных вычислительных средств позволяют создавать искусственные структуры, количество агентов которых сопоставимо с их реальной численностью.

Подытоживая отметим, что согласно перечисленным свойствам агент в АОМ является автономной сущностью, как правило, имеющей графическое представление с определенной целью функционирования и возможностью обучения в процессе существования до определенного уровня, определяемого разработчиками соответствующей модели. Примерами агентов могут быть: 1) люди (равно как и другие живые организмы), роботы, автомобили и другие подвижные объекты; 2) недвижимые объекты; 3) совокупности однотипных объектов. Вообще говоря, агентами в АОМ могут быть любые наблюдаемые в реальной жизни объекты, однако основной задачей их учета в рамках модели является их корректная спецификация.

Преимущества агентных моделей

Преимущества АОМ перед другими средствами имитационного моделирования заключаются в следующем.

- 1) АОМ позволяют смоделировать систему, максимально приближенную к реальности. Степень детализации АОМ, по сути, ограничивается только возможностью-

ми 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 [5].

АОМ могут объяснить причину возникновения таких явлений, как террористические организации, войны, обрушение рынка акций и т. д. В идеале АОМ могут помочь идентифицировать критические моменты времени, после наступления которых чрезвычайные последствия будут иметь необратимый характер.

В настоящее время АОМ стали использовать для решения множества коммерческих и технологических задач, например:

- оптимизации сети поставщиков и планирования перевозок;
- планирования развития производства;
- прогнозирования спроса на продукцию и объема продаж;
- оптимизации численности персонала;
- прогнозирования развития социально-экономических систем (городов, регионов);
- моделирования миграционных процессов;
- имитации и оптимизации пешеходного движения;
- моделирования транспортных систем;
- прогнозирования экологического состояния окружающей среды и т. д.

К примеру, корпорация Microsoft разрабатывает компьютерную АОМ социально-экономической системы мира. Также в США по заказу военных ведомств с использованием агент-ориентированного подхода разработан инструмент, позволяющий моделировать военные операции и проигрывать различные варианты боевых стратегий (System Effectiveness Analysis Simulation). Данное направление развивается и в России. Так, в 2011 г. специалистами ЦЭМИ РАН в суперкомпьютерном комплексе МГУ была запущена модель, прогнозирующая развитие социально-экономической системы России на протяжении последующих 50 лет.

Помимо этого за период с 2006 по 2015 гг. в ЦЭМИ РАН были разработаны и апробированы несколько АОМ, построенных с использованием новых технологий, в том числе на базе геоинформационных систем [2; 3]:

- АОМ автомобильных пробок г. Москвы, с помощью которой была произведена оценка загруженности дорог города от гипотетического строительства новых дорог с различной геометрией;
- АОМ рынка авиаперевозок в московском авиационном узле, позволяющая рассчитать рыночную долю авиакомпаний в зависимости от того или иного варианта перераспределения осуществляемых рейсов по трем аэропортам города;
- АОМ корпоративных слияний, позволяющая симитировать большое количество возможных сценариев объединений различных организационных культур и выбрать среди них оптимальный;
- агент-ориентированная региональная модель (АРМ) «Губернатор» для имитации социально-экономического состояния региона на основе реконструкции его вну-

тренней структуры и моделирования поведения действующих на его территории самостоятельных экономических агентов;

- демографическая АОМ, позволяющая прогнозировать развитие социально-экономической системы России на долгосрочный период;
- АОМ ракетно-космической промышленности, предназначенная для решения задач, включая (1) реакцию на внештатные политические и экономические ограничения и санкции, (2) реакцию на меры государственной промышленной политики, связанные с корректировкой существующей стратегии финансирования запланированных проектов.

В настоящее время под совместным руководством В. А. Шамахова, В. Л. Квинта и В. Н. Наумова (Северо-Западный институт управления РАНХиГС) разрабатывается крупномасштабная АОМ, рассматривающая социальную систему г. Санкт-Петербурга на базе геоинформационных технологий, детализированную до уровня отдельных индивидуумов, каждый из которых будет представлен широким набором характеристик (включая уровень образования, здоровья, профессионализма и др.).

Литература

1. Макаров В. Л., Бахтизин А. Р., Сулакшин С. С. Применение вычислимых моделей в государственном управлении. М.: Научный эксперт, 2007. 304 с.
2. Макаров В. Л., Бахтизин А. Р. Социальное моделирование — новый компьютерный прорыв (агент-ориентированные модели). М.: Экономика, 2013. 295 с.
3. Макаров В. Л., Бахтизин А. Р., Сушко Е. Д. Агент-ориентированная социо-эколого-экономическая модель региона // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2015. № 3 (288). С. 2–11.
4. Паринов С. И. Новые возможности имитационного моделирования социально-экономических систем // Искусственные сообщества. 2007. № 3–4.
5. Bonabeau E. Agent-based modeling: methods and techniques for simulating human systems. Proc. National Academy of Sciences, 2002. 99 (3). P. 7280–7287.
6. Dixon P., Parmenter B. Computable General Equilibrium Modelling for Policy Analysis and Forecasting // Handbook of Computational Economics. Vol. I / Ed. by Amman H. et al. Elsevier Science, 1996, North-Holland.
7. Feltenstein A., Shah A. General equilibrium effects of investment incentives in Mexico // Journal of Development Economics. 1995. 46. P. 253–269.
8. Harberger A. The incidence of the corporate income tax // Journal of Political Economy. 1962. 70. P. 215–240.
9. Johansen L. A multi-sectoral study of economic growth. North-Holland, Amsterdam, 1960.
10. Markusen J., Rutherford T., Hunter L. Trade liberalization in a multinational-dominated industry // Journal of International Economics. 1995. 38. P. 95–117.
11. Parker J. A Flexible, Large-Scale, Distributed Agent Based Epidemic Model // CSED Working Paper. 2007. N 52.
12. Scarf H. The computation of economic equilibria. Yale University Press, New Haven and London, 1984.
13. Taylor L. Socially relevant policy analysis: structuralist computable general equilibrium models for the developing world. MIT press, Cambridge (MA), 1990.
14. Thissen M. A Classification of Empirical CGE Modelling // SOM Research Report 99C01. University of Groningen, The Netherlands, 1998.

References

1. Makarov V. L., Bakhtizin A. R., Sulakshin S. S. *Application of computable models in public administration* [Primenenie vychislimykh modelei v gosudarstvennom upravlenii]. M.: Scientific expert [Nauchnyi ekspert], 2007. 304 p. (rus)
2. Makarov V. L., Bakhtizin A. R. *Social modeling — new computer break (agent — oriented models)* [Sotsial'noe modelirovanie — novyi komp'yuternyi proryv (agent-orientirovannye modeli)]. M.: Economy [Ekonomika], 2013. 295 p. (rus)

3. Makarov V. L., Bakhtizin A. R., Sushko E. D. *The agent-oriented social ecology and economic model of the region* [Agent-orientirovannaya sotsio-ekologo-ekonomicheskaya model' regiona] // National interests: priorities and safety [Natsional'nye interesy: priority i bezopasnost']. 2015. N 3 (288). P. 2–11. (rus)
4. Parinov S. I. *New opportunities of imitating modeling of social and economic systems* [Novye vozmozhnosti imitatsionnogo modelirovaniya sotsial'no-ekonomicheskikh system] // Artificial communities [Iskusstvennye soobshchestva]. 2007. N 3–4. (rus)
5. Bonabeau E. *Agent-based modeling: methods and techniques for simulating human systems* // Proc. National Academy of Sciences. 2002. 99 (3). P. 7280–7287.
6. Dixon P., Parmenter B. *Computable General Equilibrium Modelling for Policy Analysis and Forecasting* // Handbook of Computational Economics. Vol. I / Ed. by Amman H. et al. Elsevier Science, 1996, North-Holland.
7. Feltenstein A., Shah A. *General equilibrium effects of investment incentives in Mexico* // Journal of Development Economics. 1995. 46. P. 253–269.
8. Harberger A. *The incidence of the corporate income tax* // Journal of Political Economy. 1962. 70. P. 215–240.
9. Johansen L. *A multi-sectoral study of economic growth*. North-Holland, Amsterdam, 1960.
10. Markusen J., Rutherford T., Hunter L. *Trade liberalization in a multinational-dominated industry* // Journal of International Economics. 1995. 38. P. 95–117.
11. Parker J. *A Flexible, Large-Scale, Distributed Agent Based Epidemic Model* // CSED Working Paper. 2007. N 52.
12. Scarf H. *The computation of economic equilibria*. Yale University Press, New Haven and London, 1984.