

## АГЕНТ-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ МОДЕЛИ В ИЗУЧЕНИИ КОММУНИКАЦИЙ ЭКОНОМИЧЕСКИХ АГЕНТОВ

УДК 519.865.2

**Берг Д.Б.** д.ф.-м. н., профессор  
кафедра анализа систем и принятия решений  
Уральский федеральный университет, ВШЭМ  
**Зверева О.М.** старший преподаватель  
Уральский федеральный университет, ИРИТ-РТФ

Аннотация. Существует достаточно большое количество балансовых моделей, которые с помощью математических выражений описывают процесс обменов и определяют условия выполнения баланса потоков в системе. Одной из наиболее известных математических моделей такого типа является балансовая модель Леонтьева (модель «затраты-выпуск»). Однако все эти модели имеют определенные ограничения: модель Леонтьева описывает закрытую систему, кроме того, невозможно изучить процесс обменов в динамике, а значит выработать рекомендации по его улучшению. Для решения этой проблемы было создано семейство агент-ориентированных программных моделей. В этих моделях действуют экономические агенты, которые вступают в коммуникации с целью обмена товарами друг с другом. Характеристики агентов рассчитаны на основе уравнений статического баланса Леонтьева, дополнительно в модели введены деньги. Агентам может быть назначена одна из 6 возможных стратегий поведения. В данной статье показано, как поведение отдельного агента и всех агентов как группы влияет на протекание всего коммуникационного процесса в целом. Была разработана еще одна версия модели, в которой введены внутренние (виртуальные деньги). Функционирование этой модели доказывает, что эти деньги возвращаются в закрытых циклических контурах, которые можно считать аутопоэтическими, т.к. при введении таких денег баланс сохраняется, а коммуникационный процесс ускоряется.

Ключевые слова: коммуникации, моделирование, межотраслевой баланс Леонтьева, агент-ориентированная технология, виртуальные деньги

Abstract. There are many equilibrium models which with the help of some mathematical equations describe the process of exchanges and determine the conditions under which the balance of product and money flows in the system is established. One of the most famous is the model of Leontieff's intersectoral equilibrium (input-output model). But all of these models have certain constraints. As to Leontieff's model it describes a closed system and that is why it is impossible to analyze exchange process in dynamics and, as a result, it is impossible to work out recommendations how this process can be improved. As this problem solution a set of agent-based software models was engineered. Economic agents act in these models, they communicate in order to exchange products with each other. Agent's attributes are calculated in accordance with Leontieff's static equilibrium equations. Money is introduced into the models. Simulations show that equilibrium exists in

conditions of any small money volume but if there is a money lack a crisis arises that means exchange volumes great decrease, moreover, the less money volume - the deeper and earlier crisis emerges. The question is “Can agents influence the process characteristics (system macroparameters) by means of their different ways of behavior?” It has appeared that they could really do it.

Communication process is divided into separate exchange cycles. In an exchange cycle every agent receives a chance to communicate and it makes a choice of contractor and exchange volume in accordance with its predetermined strategy of behavior. There are 5 predetermined strategies (models) of behavior:

- The first “list” strategy - all agents act in accordance to the list they are ordered in the system and the exchange volume is the maximum possible;
- The second “maximum” strategy - every agent first tries to supply its maximum requirements, the exchange volume is the maximum possible;
- The third “uniform” strategy - every agent in the exchange cycle tries to communicate with all system agents whose products he is willing to consume; the agent tries to buy their products in equal volumes;
- The fourth “succeeding” strategy – every agent tries to communicate with the succeeding according to list agent: if the exchange act with this contractor is impossible the agent try to choose the contractor further in the list, the exchange volume is the maximum possible;
- The fifth “neighborhood” strategy – agent tries to communicate with his neighbor agents, in case of impossible exchanges with them it widens this neighborhood; the exchange volume is the maximum possible.

The optimal strategy in the view of communication process speed and crisis effects reduction appears to be the fourth one. The very interesting additional effect of “egoism” has been revealed. It arises when an agent chooses less optimal strategy. It results in its own benefit but this act spoils the overall situation in the system and the final characteristics of agent’s neighbors as well.

The second model simulates the work of an open communication system because single system agent is determined to be “the environment”. There are two types of money in the model: the first one is common real money and the second one is internal, or virtual, money. The first type money is used in all exchanges and the second supports the exchanges between internal agents (non-environmental exchanges). Money volumes are restricted and they are in proportion with the product volumes in the system. During the exchanges agents first try to spend internal money and if there is not enough volumes of this kind money than real money are used for exchanges.

Experiments show that if the agent attributes are in accordance with Leontieff’s equilibrium than communication process is a success. And if the environmental agent becomes the first agent in the list than virtual money works as the real one accelerating the communication process. We argue that in the system there are closed contours in which internal money flows and we have a possibility to discuss autopoietic patterns which exist in the system.

Model was verified on the real economic data collected for a small municipality.

Agent-based technology gives a chance to animate static mathematical model and to receive the results that can be used for recommendations working out. These recommendations can be used by economic agents in conditions of crisis. Agent-based technology is known as “the right mathematics for economic and social systems”.

Keywords: Communications, Simulation, Leontieff’s intersectoral equilibrium, Agent-based technology, Money

## **Введение**

Существует достаточно большое количество балансовых моделей, которые с помощью математических выражений описывают процесс обменов и определяют условия выполнения баланса товарно-денежных потоков в системе. Наиболее известной макроэкономической балансовой моделью является модель межотраслевого баланса Леонтьева (модель «затраты-выпуск»), за которую автор в 1973 году получил Нобелевскую премию по экономике [1].

Как и любая модель, модель Леонтьева имеет определенные ограничения:

- описывает закрытую систему – все агенты, производственные сектора, обмениваются товарами внутри системы, ничего не выводя за ее границы и не получая извне;
- все агенты производят разные товары (невозможна ситуация, при которой несколько агентов производят один и тот же товар), что также делает модель далекой от реальной жизни;
- невозможно проследить процесс обменов (условно названный «коммуникационным» процессом) в динамике.

Первое и третье ограничение было снято в агент-ориентированных моделях, построенных на основе уравнений баланса Леонтьева.

Для исследования систем, состоящих из большого количества элементов (агентов) с уникальными свойствами, нелинейно взаимодействующих друг с другом, обычно и применяют агент-ориентированную технологию моделирования [2]. Модель, основанная на этой технологии, представляет собой динамическую систему с независимыми сущностями (агентами), вступающими во взаимодействие друг с другом через некоторую среду. Задав правила поведения отдельных агентов, можно исследовать характеристики системы в целом, изучать динамику изменения ее микро- и макропараметры.

Агент-ориентированная технология моделирования получила широкое распространение в последние годы. С ее использованием решают задачи из самых разных областей: физики [3], биологии [4], экономики [5], социальных наук [6], геоинформатики [7] и др.

Агент-ориентированная технология моделирования особенно подходит для создания моделей экономических и социальных систем (ряд интересных примеров использования такой технологии именно в этой сфере можно найти в [8, 9]). Об агент-ориентированном моделировании говорят как о «правильной» математике для социальных наук [10], так как состояния общества, законы его развития, как правило, невозможно описать с помощью математических

формул. Поэтому в экономической науке появилось целое направление Agent-based computational Economics (Агент-ориентированная вычислительная экономика)[11, 12].

Типы агентов в моделях могут быть разными. Агенты могут действовать по определенным правилам, которые постоянны во времени, или обучаться, накапливать знания и менять свое поведение в соответствии с этими знаниями (интеллектуальные агенты) [13]; но даже в моделях с агентами, действующими по заранее определенным алгоритмам (стратегиям) можно получать интересные результаты.

### Первая агент-ориентированная модель с 5 стратегиями обмена

Созданная агент-ориентированная модель имитирует протекание коммуникационного процесса, состоящего из операций обмена товаров на деньги. Межотраслевой баланс (МОБ) Леонтьева определяет условия этого обмена, задавая для каждого агента (отрасли) ограничения на потребление сырья (продукции других отраслей) и задавая объем ее собственного выпуска.

Агенты ( $i=1..n$ ) производят продукцию в объемах  $x_i$ , где  $\vec{X}$  ( $\vec{X} = (x_i)_{i=1}^N$ ) – вектор выпуска экономической системы. Для обеспечения своего производства агенты потребляют продукцию других агентов этой экономической системы в объемах  $w_{ki}$ , где  $w_{ki}$  – потребность  $i$ -ого агента в продукции  $k$ -ого агента. Для каждого  $i$ -ого агента системы можно говорить о существовании вектора  $\vec{W}_i$  потребностей в продукции других агентов ( $\vec{W}_i = (w_{ik})_{k=1}^N$ ).

Потребность  $i$ -ого агента в продукции  $k$ -ого агента ( $w_{ki}$ ) прямо пропорциональна объему выпуска  $i$ -ого агента ( $x_i$ ) и определяется технологией производства этого агента. Коэффициент пропорциональности  $a_{ki} = \frac{w_{ki}}{x_i}$  является безразмерным. Совокупность таких коэффициентов  $a_{ki}$  ( $k=1..n, i=1..n$ , при условии  $n$  агентов в экономической системе) образует технологическую матрицу ( $A$ ). Элемент  $a_{ki}$  показывает, какое количество продукции  $k$ -го агента требуется для производства единицы продукции  $i$ -го агента.

Вектор потребностей  $i$ -ого агента имеет вид:

$$\vec{W}_i = [a_{1i} \cdot x_i, a_{2i} \cdot x_i, \dots, a_{ni} \cdot x_i], \quad (1)$$

В общем случае после обмена произведенной продукцией между агентами у каждого агента остается некоторая часть своей продукции, расходуемая на непроизводственное потребление ( $y_i$ ). Вектор  $\vec{Y}$  ( $\vec{Y} = (y_i)_{i=1}^N$ ) – вектор свободных остатков экономической системы.

Статический вариант МОБ Леонтьева определяется следующим векторным уравнением:

$$\vec{X} - A\vec{X} = \vec{Y}, \quad (2)$$

Вектора  $\vec{X}$  и  $\vec{Y}$  обычно задаются в стоимостном выражении.

В любых процессах обмена товарами всегда участвуют деньги, поэтому они введены в модель.

Для осуществления обменов каждый агент использует деньги ( $m_i$ ), находящиеся на его счету. В модели принято, что значение  $m_i$  пропорционально объему продукции, который он производит ( $x_i$ ):

$$m_i = K \cdot x_i \quad (3),$$

где  $K$  – коэффициент обеспеченности деньгами экономической системы, он одинаков для всех агентов.

Характеристиками  $i$ -го агента являются: объем производства ( $x_i$ ), свободный остаток ( $y_i$ ), список потребностей в продуктах других агентов ( $\bar{W}_i$ ), сумма денег на счету агента ( $m_i$ ). Некоторые характеристики не изменяются в процессе моделирования (например, свободный остаток,  $y_i$ ), другие являются динамическими.

Система в целом характеризуется вектором выпуска агентов ( $\vec{X} = (x_i)_{i=1}^N$ ), вектором свободных остатков ( $\vec{Y} = (y_i)_{i=1}^N$ ), технологической матрицей ( $A$ ), и коэффициентом обеспеченности деньгами ( $K$ ).

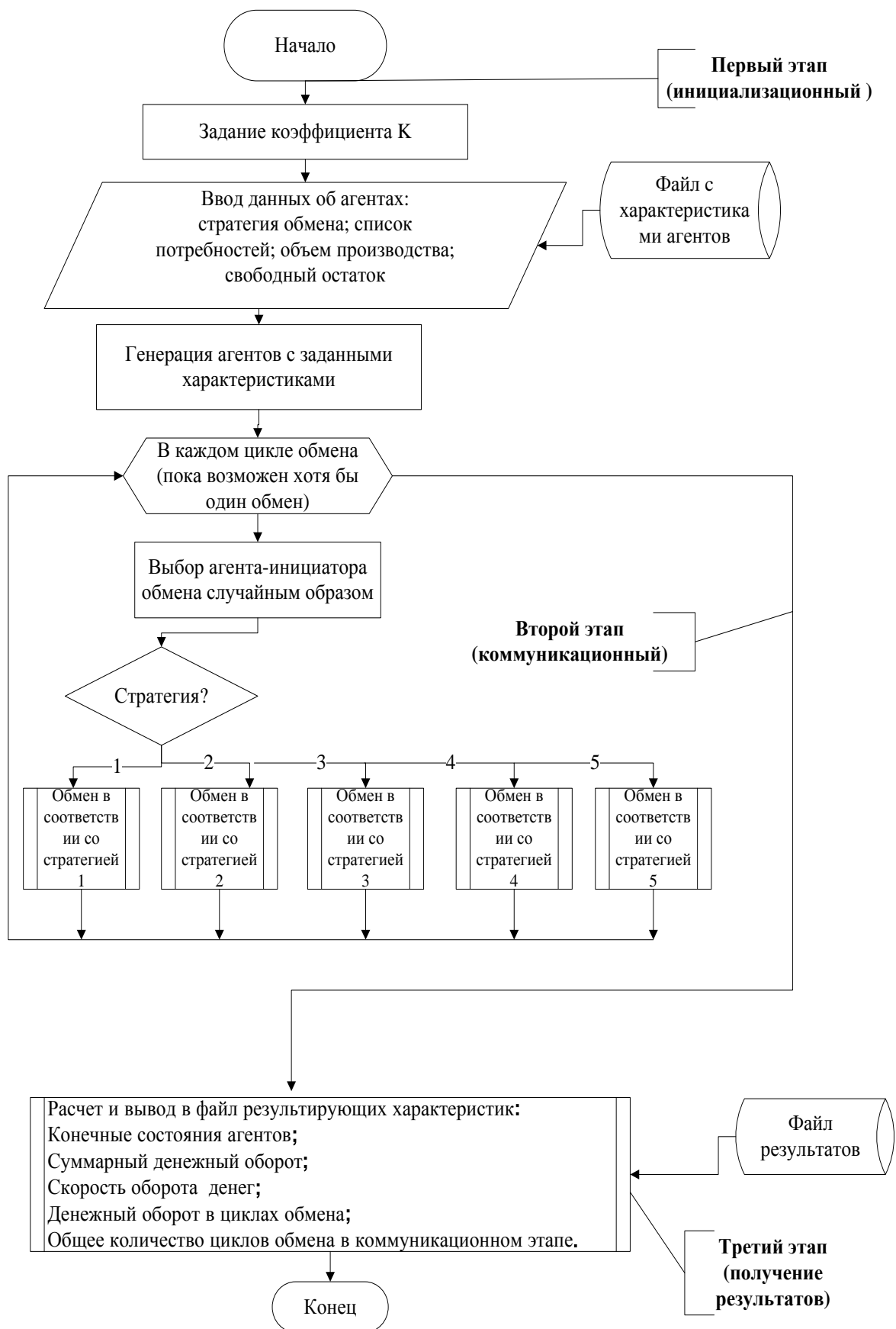
Модель функционирует согласно алгоритму, схема которого представлена на рис.1. Алгоритм состоит из трех основных этапов. Первый этап – инициализационный: создаются агенты, начальные значения их характеристик считываются из заранее подготовленного файла; устанавливается коэффициент обеспеченности деньгами ( $K$ ) с помощью управляющего элемента в окне программной модели; рассчитываются денежные суммы, зачисляемые на счет агентов. Второй этап – коммуникационный: моделируются обмены между агентами в системе. Третий этап – получение результатов: производится расчет результирующих значений макропараметров системы и запись их в выходной файл.

Коммуникационный этап состоит из циклов обмена. Во время цикла обмена каждый из агентов системы, выбираемый случайным образом, пытается совершить обмен в соответствии с определенной для него стратегией обмена.

Стратегия обмена – это характеристика поведения агента, которая определяет объем обмениваемой продукции и алгоритм поиска одного (или нескольких) контрагентов.

В модели предусмотрено 5 возможных стратегий поведения:

- в первой «списковой» стратегии все агенты действуют в соответствии со списком, по которому они упорядочены в системе, при этом объем очередного обмена максимально возможный;
- во второй «максимальной» каждый из агентов пытается в первую очередь обеспечить свои максимальные потребности, объем очередного обмена максимально возможный;
- в третьей «равномерной» стратегии агент пытается одновременно вступить в контакт со всеми агентами, в товарах которых нуждается, объемы



**Рисунок 1. Схема алгоритма работы модели**

- обмена с каждым из контрагентов одинаковые и определяются количеством денег, которые есть у агента, инициировавшего обмен;

- в четвертой «последовательной» стратегии агент пытается вступить в контакт со следующим за ним по списку агентом, если обмен невозможен, то движется дальше по списку, объем обмена максимально возможный;

- в пятой стратегии, стратегии «окрестности», агент пытается взаимодействовать с соседними по списку агентами, в случае невозможности обменов, расширяя эту окрестность, объем обмена максимально возможный.

Коммуникационный этап длится до тех пор, пока возможен хотя бы один обмен в системе, т.е. существует хотя бы один агент ( $i$ -ый), у которого в списке потребностей есть хотя бы одна не нулевая текущая потребность ( $w_{ji}$ ,  $j$ -ая по списку), ненулевое количество денег на счету ( $m_i$ ), а у соответствующего  $j$ -ого агента, называемого далее контрагентом, есть в наличии продукция ( $x_j$ ), т.е. пока истинно следующее высказывание:

$$[\exists i, \exists j: (w_{ji} \neq 0) \wedge (m_i \neq 0) \wedge (x_j \neq 0)], \quad (4)$$

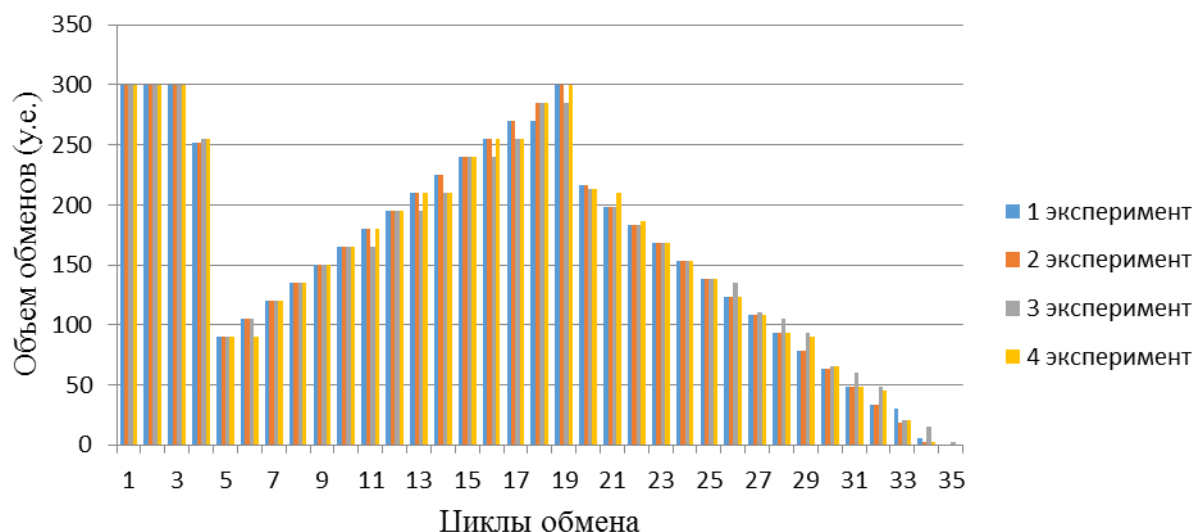
### **Результаты моделирования с помощью первой модели**

На этой модели была проведена серия экспериментов для разных наборов данных. Эти наборы данных были рассчитаны с помощью векторного уравнения (2) в табличном процессоре Excel.

Были получены следующие результаты.

1. Для всех стратегий поведения количество циклов обмена, необходимых для удовлетворения потребностей всех агентов в продукции друг друга, монотонно снижается с увеличением общего количества денежной массы в системе. Было выявлено три типа поведения системы: длительный и достаточно равномерный обмен (количество денежных средств меньше 30% стоимости товарной массы), нестабильный обмен (обеспеченность деньгами по отношению к товарной массе 40-80%), быстрый стабильный обмен (количество денег в системе более 80% стоимости товаров). Нестабильность системы проявляется в значительном разбросе значений объема денежных средств, используемых в цикле обмена (разброс до 50%). Следствием этого является фактическое недоиспользование денежных средств, которых и так недостаточно в системе. Более подробно о результатах этих экспериментов можно узнать, обратившись к [14].

2. При недостатке денежных средств и использовании агентами первой и второй стратегии обмена в системе возникают «кризисные» явления, заключающиеся в том, что в определенные моменты времени объемы обменов падают. Затем происходит восстановление объемов обмена и выход из кризиса. Причем, чем меньше денег в системе, тем кризис наступает быстрее, тем он глубже и выход из него более затяжной. Результаты одного из экспериментов представлены на рис.2, на котором хорошо видно наступление такого кризиса.



**Рисунок 2. Результаты эксперимента в системе из 20 агентов при коэффициенте обеспеченности деньгами 0,2 и второй (максимальной) стратегии обменов у всех агентов**

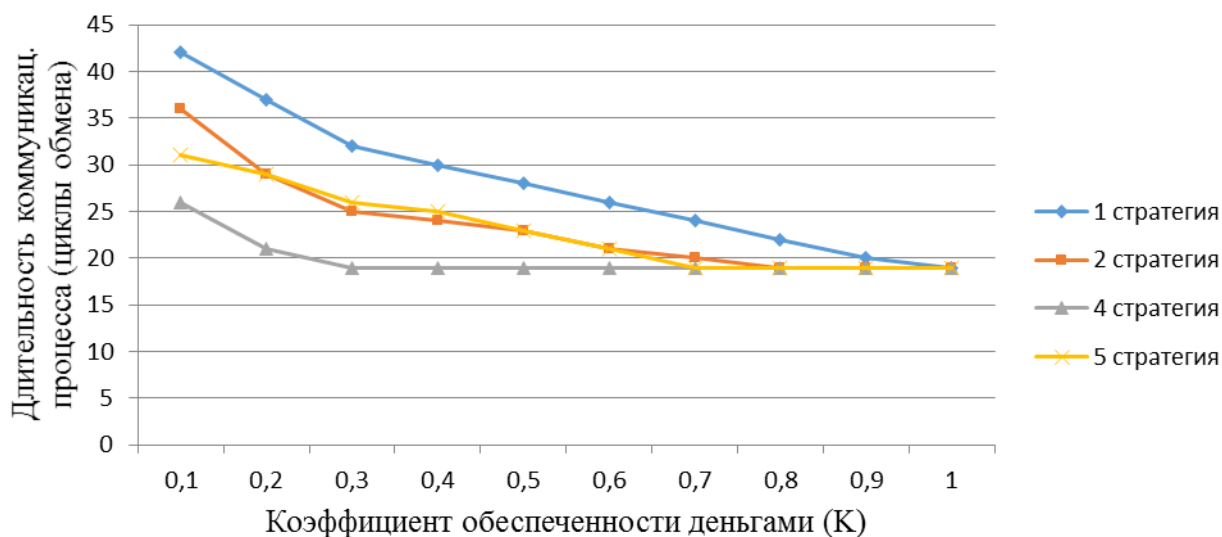
При 3 и 4 стратегиях обмена кризисных явлений практически нет. При 5 стратегии обменов небольшие кризисные явления возникают в условиях очень малой обеспеченности деньгами ( $K < 0,1$ ).

3. Третья стратегия обмена является оптимальной в том случае, если необходимо начать производство, как можно раньше, не ожидая момента полного обеспечения агента ресурсами.

4. В ходе экспериментов был выявлен эффект «эгоизма», заключающийся в том что, если агент меняет свою стратегию на менее оптимальную, то он выигрывает лично, но ухудшает характеристики соседних агентов и всего процесса в целом.

5. Если сравнивать влияние стратегий обмена на длительность коммуникационного этапа, то оптимальной является четвертая стратегия. Примерно одинаковые результаты дают 2 и 5 стратегия, и худшие результаты показывает система, если действующие в ней агенты используют 1 стратегию обмена. Это хорошо видно на рис. 3.





**Рисунок 3. Зависимость длительности коммуникационного процесса от коэффициента обеспеченности деньгами в системе при разных стратегиях обмена, применяемых агентами системы**

### **Вторая модель, использующая внутренние деньги**

Одним из недостатков классической модели Леонтьева является то, что она описывает замкнутую систему. Была создана вторая программная модель (рис. 4), в которую введен агент еще одного типа – внешняя среда. В модели используется дополнительный вид денежных средств – внутренние (виртуальные) деньги. О возможности функционирования таких единиц расчета писал Бернар А. Лиетар [15].

Реальные деньги могут быть использованы во всех обменах, а внутренние – только в обменах между внутренними агентами. Количество денег в системе (реальных и внутренних) ограничено и пропорционально объему продукта в системе. При обменах агенты стараются сначала использовать внутренние деньги, а если это невозможно (один из агентов, участвующих в обмене – внешняя среда, или внутренних денег на счету агента нет), то – реальные деньги.

Эксперименты показали, что и в таких условиях, если характеристики агентов, удовлетворяют условиям баланса Леонтьева, коммуникационный процесс завершается успешно. При этом, если внешняя среда – первый агент в системе, то во всех случаях внутренние деньги срабатывают как реальные, значительно ускоряя коммуникационный процесс. Зависимость, представленная на рис.5, создана для системы, в которой все агенты придерживаются самой неоптимальной – первой стратегии обменов, и даже в этих условиях коммуникационный процесс протекает значительно быстрее.

В системе образуются замкнутые контуры, по которым движутся внутренние деньги, т.е. можно говорить о наличии аутопоэтических паттернов в системе.

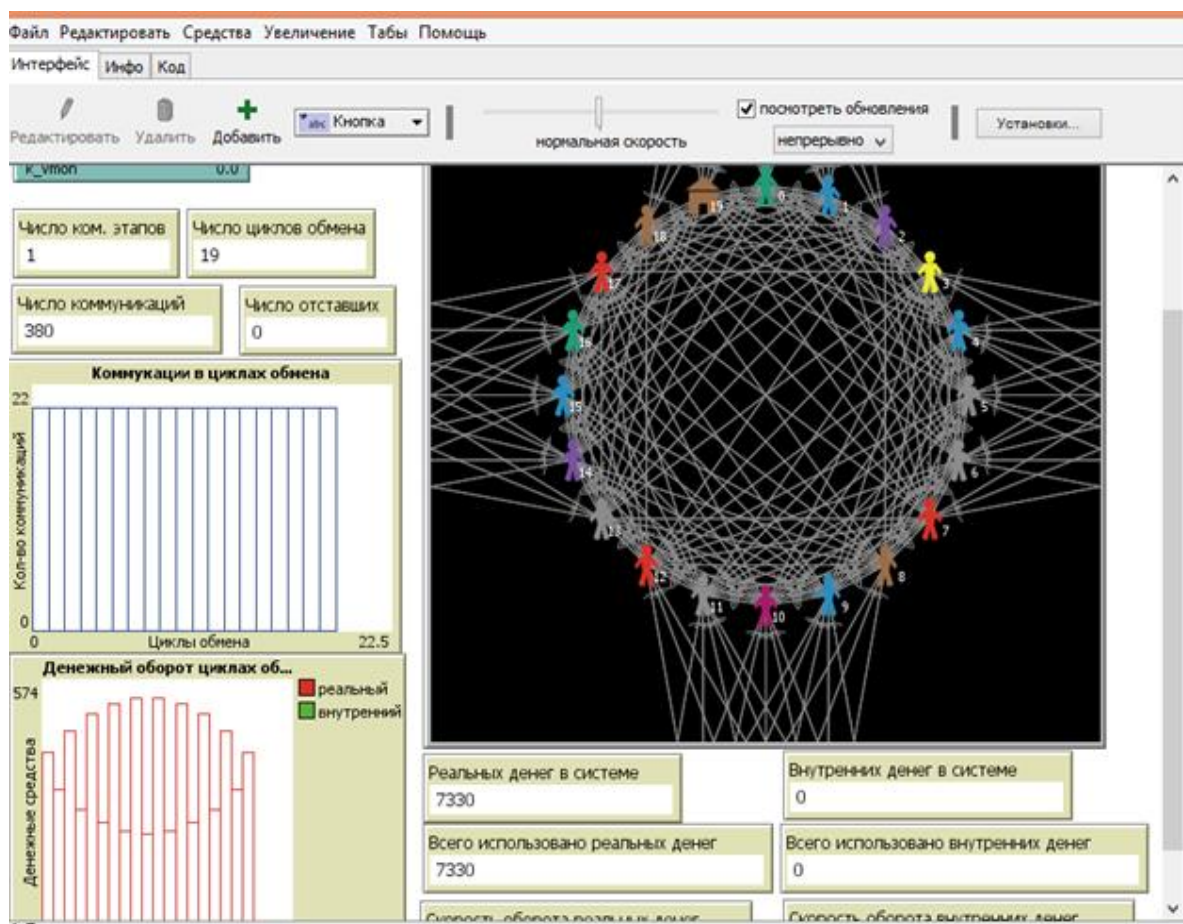


Рисунок 4. Окно второй программной модели с введенными внутренними деньгами (создана в среде NetLogo [16])



Рисунок 5. Зависимость длительности протекания коммуникационного процесса от коэффициента обеспеченности внутренними деньгами (при коэффициенте обеспеченности реальными деньгами 0,3 и первом агенте – внешней среде)

## Выводы

Агент-ориентированные модели, созданные на основе статического балансе Леонтьева, позволили снять ограничения, присущие этой математической модели. Процесс коммуникаций с помощью этих моделей можно изучать в динамике, получая временные характеристики, и изучая денежный оборот в

системе. Были определены условия, при которых возникают кризисные явления и выработаны рекомендации по их уменьшению.

В одной из моделей были введены внутренние деньги, и эксперименты показали, что такой вид денежных средств может значительно улучшить характеристики системы.

Данная работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 15-06-04863 «Математические модели жизненного цикла локальных платежных систем».

### **Список литературных источников**

1. Леонтьев В.В. Экономические эссе. Теории, исследования, факты и политика: Пер. с англ. / В.В. Леонтьев. — М.: Политиздат, 1990. — 415 с.
2. Борщев А. Практическое агентное моделирование и его место в арсенале аналитика. //Exponenta PRO, #3-4 (7-8) 2004, с. 38–47.
3. Z. Duan, J. Wang, and L. Huang. Attraction/repulsion functions in a new class of chaotic systems. //Physics Letters A, vol. 335, Feb. 2005, P. 139–149.
4. ABM for Systems Biology [Электронный ресурс]. URL: <http://www.abmsystemsbiology.info/> (дата обращения: 01.08.2014)
5. L. Tesfatsion. Agent-Based Computational Economics [Электронный ресурс]. URL: <http://www.econ.iastate.edu/tesfatsi/ace.htm> (дата обращения: 01.07.2014).
6. P. Davidsson. Agent Based Social Simulation: A Computer Science View, Jan. 2002; [Электронный ресурс]. URL: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/5/1/7.html> (дата обращения: 05.08.2014).
7. Crooks. GIS and Agent-Based Modelling: January 2007, GIS and Agent-Based Modelling, Jan. 2007; [Электронный ресурс]. URL: [http://gisagents.blogspot.com/2007\\_01\\_01\\_archive.html](http://gisagents.blogspot.com/2007_01_01_archive.html) (дата обращения: 05.08.2014).
8. John Duffy, M.Utku Unver. Internet Auctions with Artificial Adaptive Agents: A study on Market Design. Journal of Economic Behavior & Organization 67 (2008) P. 394–417.
9. Georges Harras, Didier Sornette. How to grow a bubble: A model of myopic adapting agents. Journal of Economic Behavior & Organization 80 (2011) P.137–152.
10. Paul L. Borrill, Leigh Tesfatsion. Agent-Based Modeling: The Right Mathematics for the Social Sciences. //Working Paper № 10023, July, 2010.
11. Бахтизин А.Р. Агент-ориентированные модели экономики /А.Р. Бахтизин.– М.: ЗАО «Изд-во «Экономика», 2008. – 279 с.
12. Shu-Heng Chen. Varieties of Agent-Based Computational Economics: A Historical and Interdisciplinary Perspective. //Journal of Economic Dynamics & Control (2011).
13. Giancarlo Guizzardi, Gerd Wagner. Towards an Ontological Foundation of Agent-Based Simulation. //Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference, pp.284-295.
14. Зверева О.М., Берг Д.Б. Агент-ориентированная модель коммуникаций экономической системы в условиях межотраслевого баланса Леонтьева.

Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического Университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление, №6 (186), 2013 (стр. 77-86). Санкт-Петербург, 2013.

15. Бернар А. Лиетар. Будущее денег: новый путь к богатству полноценному труду и более мудрому миру / Бернар А. Лиетар. – М.: КРПА Олимп: АСТ:Астрель, 2007. – 493с.

16. NetLogo Home Page. [Электронный ресурс]. URL: <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/> (дата обращения 20.06.2013).

## **ПРОГРАММА ДЛЯ ЭВМ "МОДЕЛИРОВАНИЕ МИГРАЦИОННОГО ДВИЖЕНИЯ И ЕГО ЭКОНОМИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ"<sup>52</sup>**

УДК 338.26:314.7:338.27

**Куклин А.А.**, д.э.н., профессор  
руководитель Центра экономической безопасности,  
Институт экономики УрО РАН

**Васильева А.В.**, к.э.н., научный сотрудник  
Цentra экономической безопасности,  
Институт экономики УрО РАН

**Быков Д.С.**, к.ф.-м.н., программист,  
ООО "Прикладные технологии - Екатеринбург"

**Тарасьев А.А.**, аспирант,  
экономист Центра экономической безопасности,  
Институт экономики УрО РАН

Аннотация. С использованием языка Java/Javascript была разработана программа для ЭВМ, позволяющая прогнозировать движение миграционных потоков между странами СНГ и регионами Российской Федерации и оценить их влияние на рынки труда принимающих регионов. В основу программы заложены динамические модели прогнозирования трудовой миграции. Программа характеризуется высокой скоростью обмена данными со статистическими базами, удобством импорта данных, идентификации параметров, широким выбором сервисов для представления полученных результатов.

Ключевые слова: программа для ЭВМ, прогноз, миграционное движение, экономический эффект

Abstract. With use of the Java/Javascript language the computer program allowing to predict the movement of migratory streams between the CIS countries and regions of the Russian Federation and to estimate their influence on labor markets of the accepting regions was developed. The basis of this program is a dynamic models of labor migration forecasting. The program is characterized by the

---

<sup>52</sup> Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-18-00574 «Информационно-аналитическая система «Антикризис»: диагностика регионов, оценка угроз и сценарное прогнозирование с целью сохранения и усиления экономической безопасности и повышения благосостояния России»).