

# Особенности коммуникаций между функционально сопряжёнными агентами производственной сети

Д.Б. Берг, О.М. Зверева

В статье приведены результаты исследования коммуникаций в системе сетевой структуры, элементами которой являются экономические агенты. Система замкнута: агенты производят и потребляют продукты друг друга. Обмены между ними осуществляются в объёмах, соответствующих условиям межотраслевого баланса Леонтьева. Акт коммуникации состоит из двух частей: в одной происходит передача продукции, в другой в обратном направлении производится передача денег. Для изучения процесса коммуникации создана имитационная модель с применением агент-ориентированной технологии. Агенты используют разные стратегии обмена, что отражается на макропараметрах системы. Расчётные эксперименты проводились как на модельных, так и на реальных данных, отражающих экономические связи между субъектами хозяйственной деятельности муниципального образования. Получены зависимости длительности процесса коммуникаций от стратегий обмена агентов в условиях различных финансовых ограничений.

*Ключевые слова:* коммуникации, моделирование, производственная сеть, межотраслевой баланс Леонтьева, агент-ориентированная технология.

## 1. Введение

Коммуникации составляют основу функционирования социальных и экономических систем [1]. В каждом коммуникационном акте агенты системы могут обмениваться информацией и смыслами [2], деньгами, услугами, продукцией материального производства, энергией и др. Совокупность коммуникаций экономических агентов образует сеть. Если эти агенты связаны между собой постоянными производственными отношениями, то структура такой сети будет устойчивой во времени. В настоящее время, согласно Кастельсу [3], «в условиях информационной эры историческая тенденция приводит к тому, что доминирующие функции и процессы все больше оказываются организованными по принципу сетей». Сетевая организация структуры становится все более значимой для большинства экономических и социальных систем. Посредством сетей умения и знания, преобразованные в товары и услуги, распространяются на обширные пространства.

Реальная производственная сеть представляет собой совокупность отдельных агентов (предприятий), у которых каждый акт коммуникации состоит из двух частей: в одной части происходит передача продукции, в другой в обратном направлении производится передача денег (или обязательств). Поскольку деньги используются при любом акте коммуникации между агентами производственной сети, то они, очевидно, способны оказывать существенное влияние на макропараметры социально-экономической системы.

Связи между агентами производственной сети определяются их потребностями в ресурсах (сырье), которые являются продуктами производства других агентов. Количество и виды необходимых ресурсов определяются производственной технологией, используемой агентом. Подобная взаимная зависимость на уровне отраслей представлена в модели межотрас-

левого баланса (МОБ) Леонтьева [4], которая описывает необходимость взаимных поставок между отраслями.

Целью исследования является изучение особенностей коммуникаций между функционально-сопряженными (в условиях МОБ Леонтьева) агентами производственной сети с различными финансовыми ограничениями. Объектом исследования является замкнутая производственная сеть коммуникаций экономических агентов, конечной целью функционирования которых является взаимное удовлетворение потребностей друг друга путем эквивалентного обмена продукцией (товарами и услугами).

Функционирование социальных и экономических сетей реализуется на микроуровне путем парных взаимодействий – коммуникаций – ее элементов. Множество этих взаимодействий определяет значения макропараметров системы и динамику их изменений. Это наиболее интересный тип самоорганизации, с которым связана способность индивидуальных микроскопических открытых систем к объединению в макросистемы и прогрессивной эволюции [5, 6].

Для исследования систем, состоящих из большого количества элементов (агентов) с уникальными свойствами, нелинейно взаимодействующих друг с другом, используют агент-ориентированную технологию моделирования [7]. 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 за последние 20 лет. С ее использованием решают задачи из самых разных областей: физики [8], биологии [9], экономики [10], социальных наук [11], геоинформатики [12] 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 [13, 14]). Об агент-ориентированном моделировании говорят как о «правильной» математике для социальных наук [15], 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)[16].

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). Устоявшейся классификации агентов нет, довольно удачные попытки такой классификации приведены в [17, 18].

В используемой в данном исследовании агент-ориентированной модели действуют неинтеллектуальные агенты. Парные взаимодействия (коммуникации) между агентами, заключаются в обмене продукцией или услугами в условиях МОБ. Алгоритм поведения агента определяется заранее заданной для него стратегией обмена

## 2. Описание модели

Компьютерная агент-ориентированная модель создана в свободно распространяемой программной среде NetLogo [19] и подробно описана в [20].

В модели  $N$  агентов, каждый  $i$ -ый агент производит свой уникальный продукт (агенты относятся к разным отраслям) в объеме  $x_i$ . Для производства данного объема продукции он потребляет продукты других агентов, в пропорциях, определяемых технологией его собственного производства. Потребление  $i$ -ым агентом продукции, произведенной  $k$ -ым агентом, происходит в объеме  $w_{ki}$ . Для каждого  $i$ -го агента в системе задан вектор-столбец ( $\vec{W}_i$ ) потребностей в продукции других агентов системы:

$$\vec{W}_i = (w_{ik})_{k=1}^N, \quad (1)$$

где  $N$  – количество агентов в системе.

Значение элемента  $w_{ii}$  соответствует объёму собственной продукции, используемой для внутреннего производственного потребления (согласно модели МОБ). Совокупность векторов-столбцов потребностей  $\vec{W}_i$  образует  $W$  – матрицу взаимных потребностей агентов системы размерности  $N \times N$ .

В соответствии с условием статического МОБ каждый агент производит продукции несколько больше, чем потребляют другие агенты и он сам. Остальное он использует для непроизводственных нужд. Этот остаток называется свободным и обозначается  $y_i$ .

Тогда для  $i$ -го агента уравнение статического баланса согласно модели Леонтьева будет следующим:

$$x_i = \sum_{k=1}^N w_{ki} + y_i. \quad (2)$$

Для осуществления обменов каждый агент использует деньги ( $m_i$ ), находящиеся на его счету. В модели принято, что значение  $m_i$  пропорционально объёму 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: объём своей продукции, имеющейся в наличии ( $x_i$ ), свободный остаток ( $y_i$ ), вектор текущих потребностей в продуктах других агентов ( $\vec{W}_i$ ), сумма денег на счету агента ( $m_i$ ). Некоторые характеристики не изменяются в процессе моделирования (например, свободный остаток,  $y_i$ ), другие являются динамическими. Текущие значения таких динамических характеристик указываются со штрихом.

Система в целом характеризуется вектором выпуска агентов ( $\vec{X} = (x_i)_{i=1}^N$ ), вектором свободных остатков ( $\vec{Y} = (y_i)_{i=1}^N$ ), матрицей взаимных потребностей агентов  $W$ , и коэффициентом обеспеченности деньгами ( $K$ ). Вектора  $\vec{X}$ ,  $\vec{Y}$  и матрица  $W$  задаются в стоимостном выражении.

Статическая модель МОБ Леонтьева для системы в целом задаётся следующей системой линейных уравнений:

$$\begin{cases} x_1 - \sum_{k=1}^N w_{k1} = y_1, \\ \dots \\ x_i - \sum_{k=1}^N w_{ki} = y_i, \\ \dots \\ x_N - \sum_{k=1}^N w_{kN} = y_N. \end{cases} \quad (4)$$

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 ( $K$ ); 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 один акт коммуникации в соответствии со стратегией обмена, которая для него задана. Стратегия обмена – это характеристика поведения агента, которая определяет объём обмениваемой продукции и алгоритм поиска одного (или нескольких) контрагентов.

Этот этап длится до тех пор, пока возможен хотя бы один обмен, т.е. в системе существует хотя бы один агент ( $i$ -ый), у которого в списке потребностей есть хотя бы одна ненулевая 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:

$$[\exists i, \exists j: (w_{ji}' \neq 0) \wedge (m_i' \neq 0) \wedge (x_j' \neq 0)]. \quad (5)$$

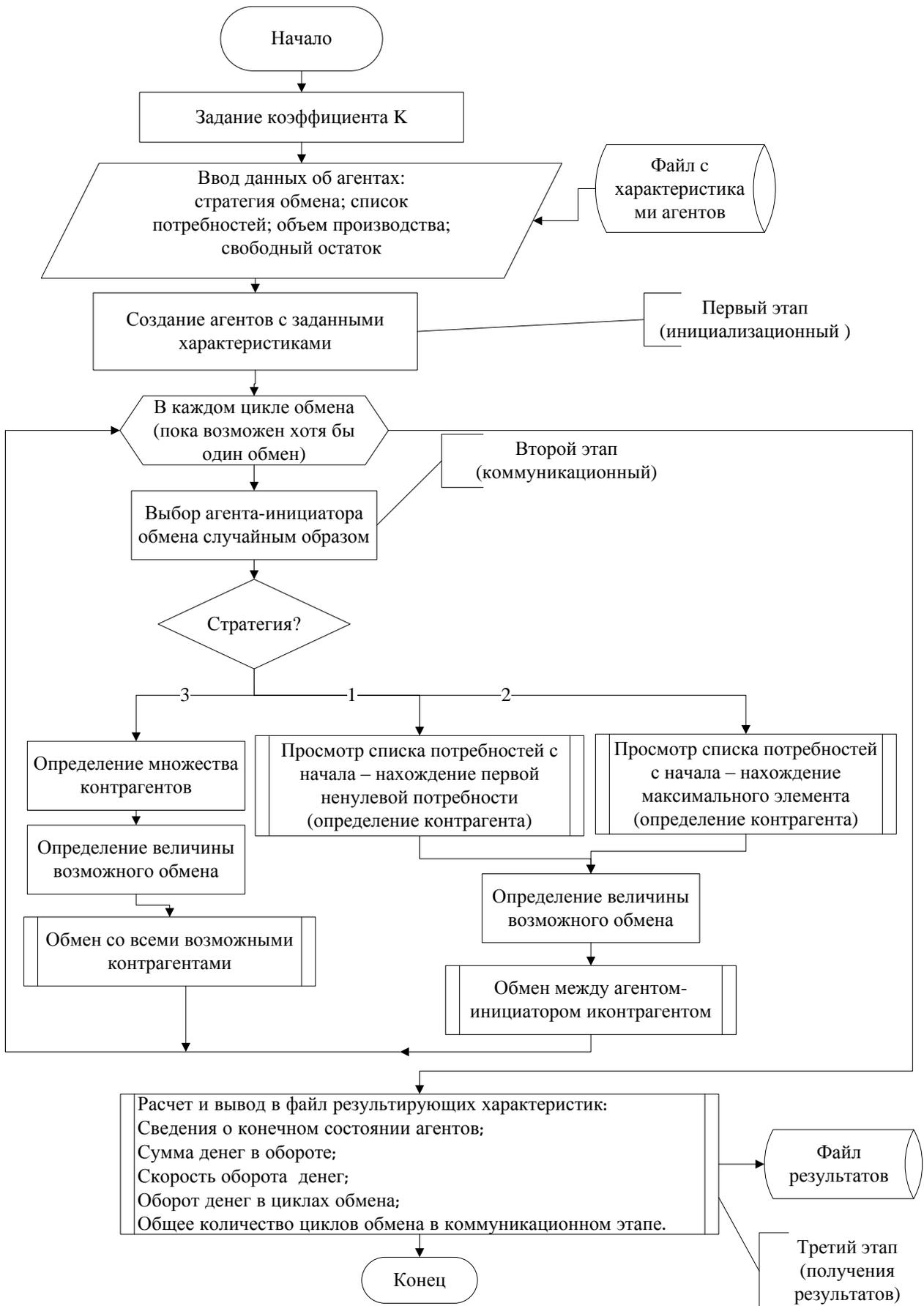


Рис. 1. Схема алгоритма расчётов по агент-ориентированной модели

Для агента может быть установлена одна из трёх базовых стратегий обмена; описания этих стратегий сведены в табл.1. Первая стратегия условно обозначена как «списковая».

Агент в каждом цикле обмена выбирает контрагента в соответствии с вектором (списком) своих потребностей ( $\vec{W}_i'$ ). Агент просматривает этот список последовательно – ищет первую ненулевую потребность, которую и пытается удовлетворить путём обмена продукта контрагента на свои деньги. Объём обмена устанавливается максимально допустимым, и вычисляется как минимум трёх значений: потребность агента ( $w_{ji}'$ ), инициировавшего обмен; сумма денег на его счету ( $m_i'$ ) и объём продукции, имеющейся для обмена у контрагента  $j$  ( $x_j'$ ).

Вторая стратегия («максимальная», табл.1) состоит в том, что агент выбирает для коммуникации контрагента, потребность в продукции которого максимальна на текущий момент. Объём продукции для обмена такой же, как и в первой стратегии – максимально допустимый.

Третья стратегия («равномерная», табл.1) по обоим параметрам отличается от первых двух стратегий, описанных выше. Каждый агент, инициатор обмена, стремится получить продукцию других агентов в равных объёмах. Этот объём рассчитывается исходя из имеющейся у агента суммы денег и количества контрагентов, в продукции которых он ещё нуждается (количество ненулевых элементов в списке текущих потребностей агента).

Таблица 1. Базовые стратегии обмена

Стратегия	Условное обознач.	Условие выбора контрагента	Количество контрагентов	Объём обмена
1– списковая	стр.1	$\exists j: w_{ji}' \neq 0, \forall k = 1..j: w_{ki}' = 0$	1	$\min(w_{ji}', x_j', m_i')$
2– максимальная	стр.2	$\exists j: w_{ji}' = \max_{1 \leq k \leq N} (w_{ki}'), w_{ji}' \neq 0$	1	$\min(w_{ji}', x_j', m_i')$
3– равномерная	стр.3	$\forall j: w_{ji}' \neq 0,$ $L$ – количество ненулевых элементов $\vec{W}_i'$	$L$	$\frac{m_i'}{L}$

(В табл. 1 через  $i$  обозначен номер агента, инициировавшего обмен, через  $j$  – номер его контрагента.)

Макропараметрами исследуемой системы являются: время, необходимое для завершения всех обменов, выраженное в циклах обмена; и время до начала производства в системе. Время до начала производства отсчитывается до того момента, когда каждый агент хоть в какой-то степени обеспечил себя продукцией других контрагентов, потребности в которой были ненулевыми. Имея все необходимые ресурсы, он может начать своё производство.

Макропараметром системы также является распределение по циклам обмена агентов, успешно завершивших обмены. Управляющие параметры в модели: стратегии обмена агентов и коэффициент обеспеченности деньгами.

### 3. Данные для моделирования

Для исследования использовались три различных матрицы взаимных потребностей ( $W$ ), все они были получены теоретически, и все они соответствуют требованиям МОБ. Чтобы результаты были сравнимы, все матрицы составлялись для 20 агентов. Агенты по производственным характеристикам одинаковы: у них равные объёмы производства ( $x_i=500$ ), они обмениваются одинаковым количеством продукции, и у них остаются одинаковые по величине свободные остатки ( $y_i=115$ ). Описание матриц взаимных потребностей агентов приведено в табл. 2.

Таблица 2. Теоретические матрицы взаимных потребностей

Номер матрицы	Матрица взаимных потребностей (W)					
	Способ формирования	Фрагмент матрицы				
1	$\forall i = 1..20, \forall j = 1..20, w_{ij} = 19.25$	19.25	19.25	19.25	19.25...	
		19.25	19.25	19.25	19.25...	
		19.25	19.25	19.25	19.25...	
		19.25	19.25	19.25	19.25...	
		...				
2	$\forall i = 1..20, \forall j = 1..20, \sum_{i=1}^{20} w_{ji} = \sum_{i=1}^{20} w_{ij} = 385$	5	6.5	8	9.5	11...
		33.5	32	30.5	29	27.5...
		5	6.5	8	9.5	11...
		33.5	32	30.5	29	27.5...
		...				
3	$\left\{ \begin{array}{l} \forall i = 1..20, \forall j = 1..20: \\ \sum_{i=1}^{20} w_{ji} = \sum_{i=1}^{20} w_{ij} = 385 \\ w_{ij} = w_{ji} \end{array} \right.$	5	6.5	8	9.5	11...
		6.5	5	33.5	32	30.5...
		8	33.5	5	6.5	9.5...
		9.5	32	6.5	5	8...
		11	30.5	9.5	8	5...
		...				

В первой матрице все агенты имеют одинаковые величины потребностей в продукции других агентов: все элементы матрицы равны 19.25.

Во второй матрице суммарные потребности агентов одинаковы и равны 385, что совпадает с суммарными потребностями агентов из первой матрицы. Элементы этой матрицы отличаются друг от друга.

В третьей матрице, кроме обеспечения равенства суммарных потребностей (как во второй матрице), выполняется условие равенства взаимных потребностей любых двух агентов сети (каждый  $i$ -ый агент получает от  $j$ -ого агента столько же продукции, сколько отдаёт ему своей продукции), т.е. третья матрица симметрична относительно главной диагонали.

#### 4. Основные закономерности коммуникаций в условиях финансовых ограничений

При проведении экспериментов изучалось влияние финансовых ограничений (количества денег в системе) в условиях использования агентами различных стратегий обмена на следующие характеристики системы:

- время завершения всех обменов в системе;
- время, необходимое для начала производства всеми агентами в системе;
- время завершения обменов отдельным агентом в системе;
- распределение агентов, успешно завершивших обмены, по циклам обмена.

При этом рассматривались как случаи, когда все агенты в одной системе придерживаются одной и той же базовой стратегии обмена, так и случаи систем, в которых разные агенты одной системы применяют при обменах разные стратегии.

Основная цель – найти ту стратегию обмена (или сочетание стратегий), при которой длительность коммуникационного этапа, выраженная в циклах обмена, будет минимальной при заданном коэффициенте обеспеченности деньгами в системе.

Исследуемые сочетания стратегий обмена описаны в табл. 3 (описания базовых стратегий приведены в табл. 1).

Таблица 3. Исследуемые сочетания стратегий обмена

Стратегия	Условное обозначение	Описание
Стратегия 1, 2	стр.1, 2	Нечётные агенты придерживаются первой стратегии, чётные – второй
Стратегия 2, 1	стр.2, 1	Нечётные агенты придерживаются второй стратегии, чётные – первой
Стратегия 1–2	стр.1–2	Первая половина агентов придерживается первой стратегии, вторая – второй
Стратегия 2–1	стр.2–1	Первая половина агентов придерживается второй стратегии, вторая – первой

Рассмотрим зависимость времени окончания обменов в системе (длительность коммуникационного этапа) от обеспеченности деньгами в системе (от величины коэффициента  $K$ ) при разных стратегиях обмена агентов. Результаты для второй матрицы (см. табл.2) показаны на рис. 2. Кривая, соответствующая второй стратегии обмена, при всех значениях  $K$  лежит ниже остальных кривых, значит, для завершения обменов в этих условиях требуется меньший временной промежуток; поэтому стратегию 2 (максимальную) можно считать оптимальной для системы в целом. Худший (наиболее длительный) вариант протекания обменов наблюдается в том случае, когда первая половина агентов в системе придерживается первой стратегии, а вторая – второй (стр. 1-2, см. табл. 3). Остальные комбинации стратегий дают некоторые промежуточные результаты.

Для первой теоретической матрицы потребностей различия не так заметны, т.к. при равных значениях элементов в векторах потребностей агентов алгоритмы списковой и максимальной стратегий работают практически одинаково. Моделирование с использованием третьей матрицы взаимных потребностей в целом подтвердило результаты экспериментов, полученные на основе первых двух матриц.

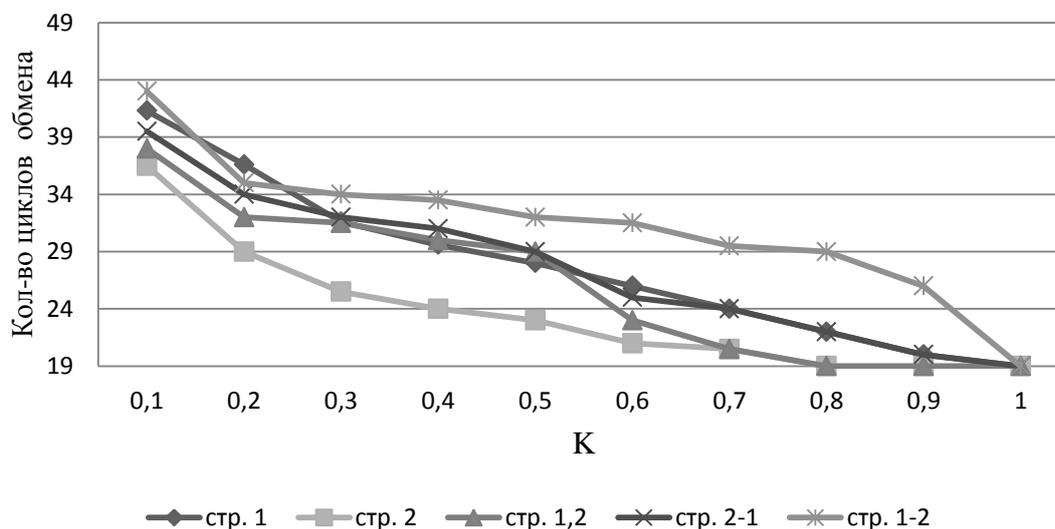


Рис. 2. Зависимость длительности коммуникационного этапа от коэффициента обеспеченности деньгами в системе  $K$  при разных стратегиях обмена экономических агентов (вторая матрица взаимных потребностей)

Из рис. 2 очевидным становится также тот факт, что какие бы стратегии ни использовали агенты, финансовые ограничения (выражаемые через коэффициент обеспеченности деньгами) значительно влияют на макропараметры системы. Чем меньше денег в системе, тем

длиннее коммуникационный этап. Подробнее влияние финансовых ограничений на макропараметры системы описано в [20].

Эксперименты показали, что, если рассматривать результаты деятельности отдельного агента (т.е. решать задачу нахождения стратегии, оптимальной для отдельного агента), то получим другой результат. Это видно из табл. 4, в которой приведены данные для нескольких агентов системы (с 3 по 7 номер), характеристики агентов рассчитаны на основе второй матрицы взаимных потребностей. Рассмотрен случай сочетания стратегий, обозначенный как «Стратегия 2, 1» (см. табл. 3). В ячейках таблицы указано количество циклов, потребовавшихся агенту для обеспечения себя ресурсами, при заданном в системе коэффициенте  $K$ . Можно заметить, что агентам с чётными номерами (первой стратегией обмена) требуется меньший временной промежуток для обеспечения себя ресурсами, чем двум их соседям с нечётными номерами (со второй стратегией обмена). Например, при  $K=0.1$  четвёртый агент обеспечивает себя ресурсами за 28 циклов, а его ближайшим соседям, придерживающимся второй стратегии, для этого требуется 29 и 30 циклов.

Таблица 4. Данные о продолжительности коммуникационного этапа для части агентов системы (на основе второй матрицы взаимных потребностей)

Номер агента	Стратегия обмена	Коэффициент ( $K$ )			
		0.1	0.2	0.3	0.4
3	2	30	19	19	19
4	1	28	19	19	19
5	2	29	19	19	19
6	1	23	19	19	19
7	2	30	24	19	19

Были изучены последствия смены одним агентом своей стратегии обмена на другую при сохранении без изменения остальных параметров системы. Был выявлен эффект «эгоистичности», который состоит в улучшении положения дел агента, сменившего стратегию, при ухудшении положения не только других агентов, но и системы в целом. Такой эффект «эгоистичности» проявляется, когда агент действует в системе с сочетанием стратегий и меняет стратегию со второй на первую, поэтому вторую стратегию можно назвать «системной», а первую – «стратегией эгоизма».

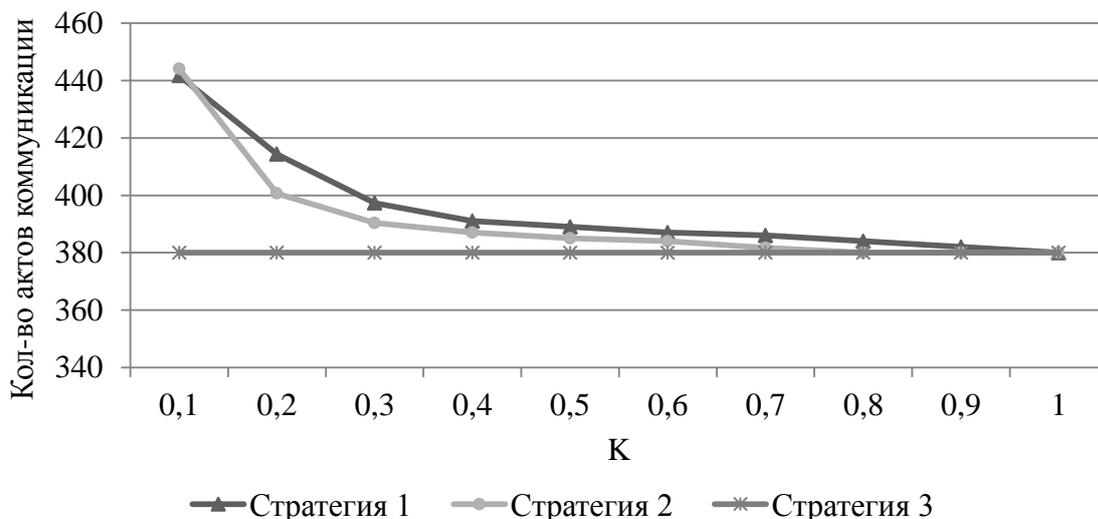


Рис. 3. Зависимость количества необходимых актов коммуникации для начала производства от коэффициента обеспеченности деньгами  $K$  при разных стратегиях обмена агентов в системе (вторая матрица взаимных потребностей)

Третья стратегия наилучшим образом проявила себя в случае, когда нужно как можно раньше начать производство, не дожидаясь окончания всего коммуникационного этапа (что хорошо видно на рис.3).

Ещё одной исследуемой характеристикой являлось распределение агентов, успешно завершивших обмена, по циклам обмена. Эта характеристика не только определяет длительность коммуникационного этапа, но и интенсивность коммуникаций.

Если рассматривать любую из матриц (см. табл. 2), то при самом лучшем исходе агенты завершат коммуникационный этап за 19 циклов обмена (каждый должен обменяться с каждым, при условии, что матрицы не содержат нулевых элементов).

Рассмотрим зависимость количества агентов, успешно завершивших обмена за первые 19 циклов (на примере второй теоретической матрицы), считая, что именно этим значением ограничена длительность коммуникационного этапа, при разных значениях  $K$ . Как видно из рис.4, оптимальной является вторая стратегия. Для построения данной диаграммы использованы средние значения, полученные в серии экспериментов.

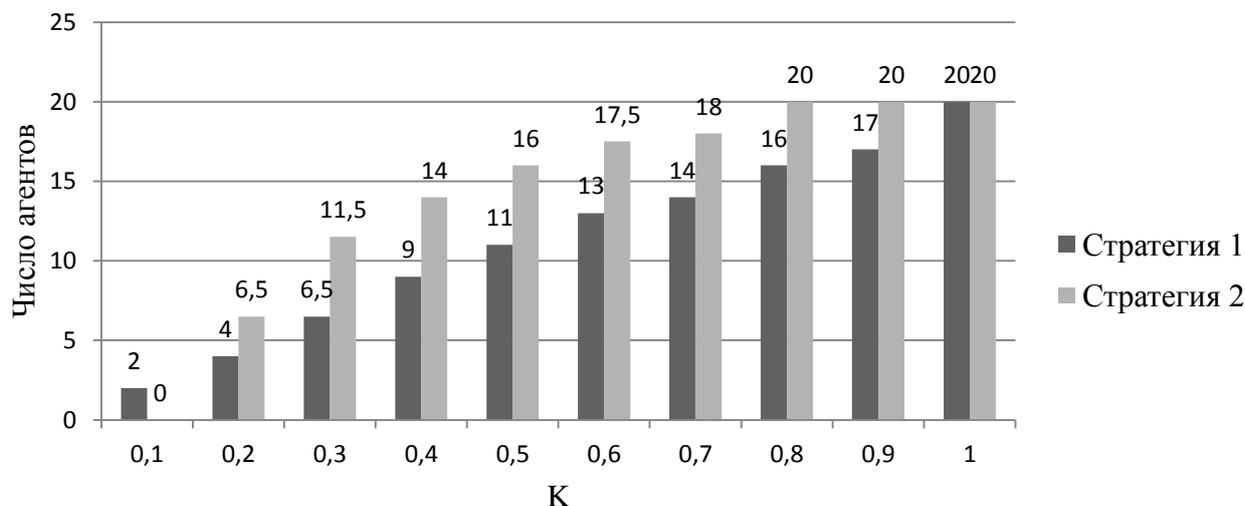


Рис. 4. Число агентов, успешно закончивших обмена за минимально возможный отрезок времени

Суммируем полученные результаты:

- финансовые ограничения увеличивают длительность коммуникационного этапа, тем самым затрудняя производственные коммуникации (поставку товаров и услуг). При  $K$ , близком к единице (в проведённых экспериментах  $K > 0.7$ ), эти ограничения снимаются;
- минимальная длительность коммуникационного этапа наблюдается при второй стратегии обменов (когда все агенты в системе придерживаются второй стратегии);
- сочетание стратегий в системе и чередование агентов с разными стратегиями обмена в производственной сети значительно влияют на время, необходимое каждому агенту для завершения своих обменов (один и тот же агент может получить преимущество при одной комбинации стратегий и стать «отстающим» – при другой);
- по минимизации времени для возобновления производства, как для системы в целом, так и для каждого агента, оптимальной является третья стратегия;
- самой «эгоистичной» стратегией является первая стратегия – она минимизирует время полного обмена отдельного агента (при условии равенства производственных характеристик агентов и при наличии в системе агентов, реализующих разные стратегии обмена).

#### 4.1. Верификация результатов расчётов по реальным данным

Верификация результатов расчётов проводилась по реальным данным, моделирующим экономику небольшого муниципального образования [21]. Матрица взаимных потребностей

построена на основе усреднённых статистических данных для муниципального образования в расчёте на 10000 жителей. Она отражает взаимные поставки продукции и услуг в сети из 11 предприятий разных производственных отраслей и населения, часть которого является работниками этих же предприятий.

Состав предприятий, составляющих производственную сеть, следующий:

1. сельскохозяйственный производственный кооператив, занимающийся выращиванием зерновых, технических культур;
2. ферма – молочное и мясное производство;
3. птицефабрика – разведение птицы, производство яиц;
4. мясокомбинат – производство продуктов из мяса и мяса птицы;
5. молочный комбинат – производство молока, молочных продуктов;
6. пекарня – производство хлебобулочных изделий;
7. мукомольный завод;
8. комбикормовый завод;
9. мебельный цех – производство домашней и офисной мебели;
10. автосервис – техническое обслуживание и ремонт автомобилей;
11. автотранспортная фирма – грузовые и пассажирские перевозки;
12. население – потребление товаров и услуг и, в то же время, трудовой ресурс для всех вышеперечисленных предприятий.

Население в модели выделено в отдельную «отрасль», которая потребляет продукцию местных предприятий и обеспечивает их важнейшим ресурсом – рабочей силой, как указано в обосновании данной матрицы [21]. В качестве исходных данных для расчёта товарных потоков между предприятиями муниципалитета была использована годовая отчётность аналогичных предприятий соответствующих отраслей, в частности: объёмы производства основного продукта, средний размер оплаты труда и среднесписочная численность сотрудников. Матрица взаимных потребностей и вектор выпуска для модели муниципалитета приведены в табл. 5.

Таблица 5. Матрица взаимных потребностей субъектов хозяйственной деятельности (агентов) муниципального образования

Агенты	Потребности в продуктах агентов ( $w_{ij}$ ), тыс.руб.												Объём пр-ва ( $x_i$ ), т.р.
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	0	0	0	0	0	0	496000	1340680	0	0	0	0	1836680
2	405	0	0	53993	590322	0	0	0	0	0	0	0	644720
3	0	0	0	79100	0	0	0	0	0	0	0	8227	87327
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	109460	109460
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	79389	79389
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	28775	28775
7	0	0	0	0	0	4081	0	0	0	0	0	0	4081
8	0	8726	419318	0	0	0	0	0	0	0	0	0	428044
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2352	2352
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	33	9000	9033
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16280	16280
12	14000	17000	40450	59000	170300	48000	16000	30000	19200	7000	7730	0	428680

Как видно из табл. 5, данная матрица  $W$  характеризуется большим количеством нулевых элементов. В реальной жизни это хорошо объяснимо, т.к. технологический процесс подразумевает потребление ограниченного числа ресурсов, устойчивые производственные связи образуются с небольшим количеством предприятий. При моделировании такая разреженная матрица приводит к тому, что количество актов коммуникации будет небольшим в сравнении с теоретическими матрицами  $W$ , не содержащими нулевых элементов.

Для реальной матрицы потребностей закономерности, выявленные для теоретических матриц взаимных потребностей, в основном подтвердились. Если рассматривать в качестве целевого показателя длительность коммуникационного этапа, то она минимальна для случая, когда все агенты применяют вторую стратегию обмена; первая стратегия и различные комбинации стратегий показывают результаты хуже (рис. 5).

### Реальный набор данных

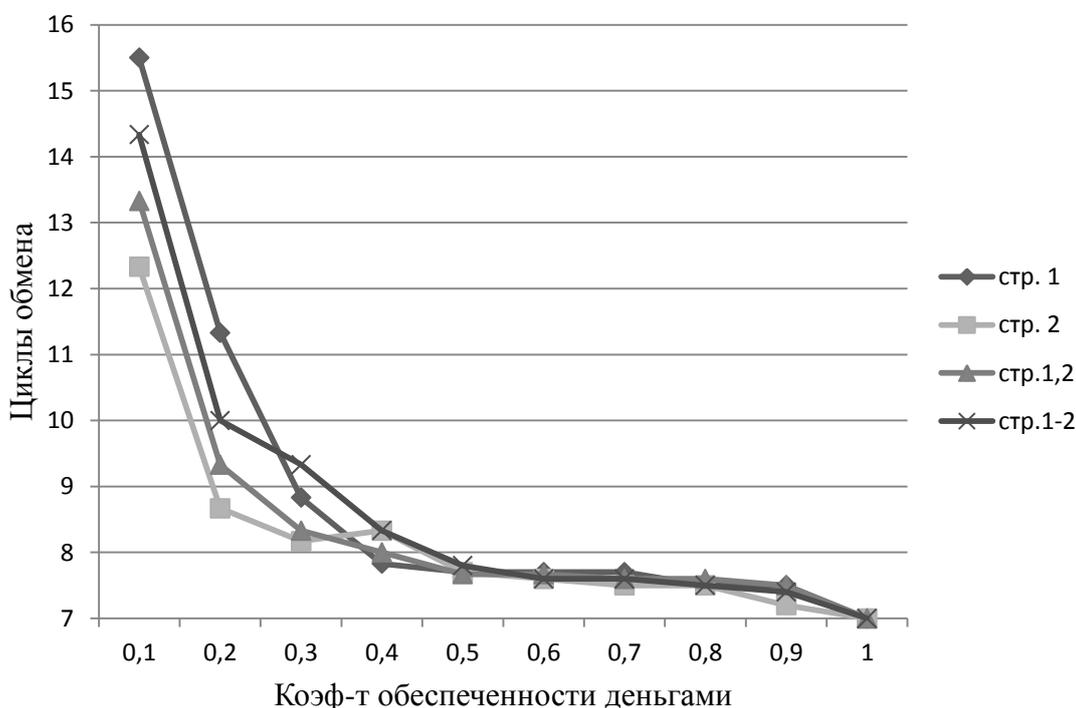


Рис.5. Зависимость длительности коммуникационного этапа от коэффициента  $K$  при разных стратегиях обмена экономических агентов для реальной матрицы потребностей

Подтвердился и тот факт, что имеющееся в системе сочетание стратегий при недостатке денег ( $K < 1$ ) значительно влияет на текущие параметры отдельного агента. Этот эффект исчезает, когда денег в системе достаточное количество (в данном случае при  $K > 0,6$ ). В табл.6 приведены экспериментальные данные о продолжительности коммуникационного этапа (средние значения серии экспериментов) для некоторых агентов системы, основанной на реальной матрице  $W$ , при разных сочетаниях стратегий и коэффициенте  $K = 0,1$ .

Таблица 6. Средние значения длительности коммуникационного этапа для отдельного агента при разных сочетаниях стратегий обмена в системе (для  $K=0.1$ )

Номер Агента	Стр.1	Стр.2	Стр.1. 2		Стр.2. 1		Стр. 1–2		Стр. 2–1	
	Длит.	Длит.	Длит.	Стр. агента	Длит.	Стр. агента	Длит.	Стр. агента	Длит.	Стр. агента
1	<b>2.3</b>	10	7.7	1	3.3	2	4	1	14	2
2	8.7	7	4.7	2	10	1	<b>4</b>	1	10	2
5	10	<b>6.7</b>	7	1	9.7	2	8.3	1	8.7	2
8	4	7.7	4.3	2	<b>3.3</b>	1	4	2	10.3	1
9	13.7	11	12	1	11.7	2	12.7	2	<b>11.3</b>	1
12	14.7	<b>10.7</b>	11.3	2	13.3	1	12.7	2	12.7	1

Как видно из табл.6, при малых  $K$  ( $K=0.1$ ) продолжительность коммуникационного этапа отдельного агента зависит от существующего сочетания стратегий обмена в системе. Так, например, первый агент может завершить коммуникации за 2 цикла (если все агенты в системе придерживаются первой стратегии), а может – за 14 (если первая половина агентов придерживается второй стратегии, а вторая – первой). Для восьмого агента наиболее удачная ситуация складывается, когда в системе существует чередование стратегий. В таблице для каждого агента выделена минимальная продолжительность его коммуникационного этапа. При этом можно сделать вывод, что для первой половины агентов предпочтительной является первая стратегия, а для второй половины – вторая.

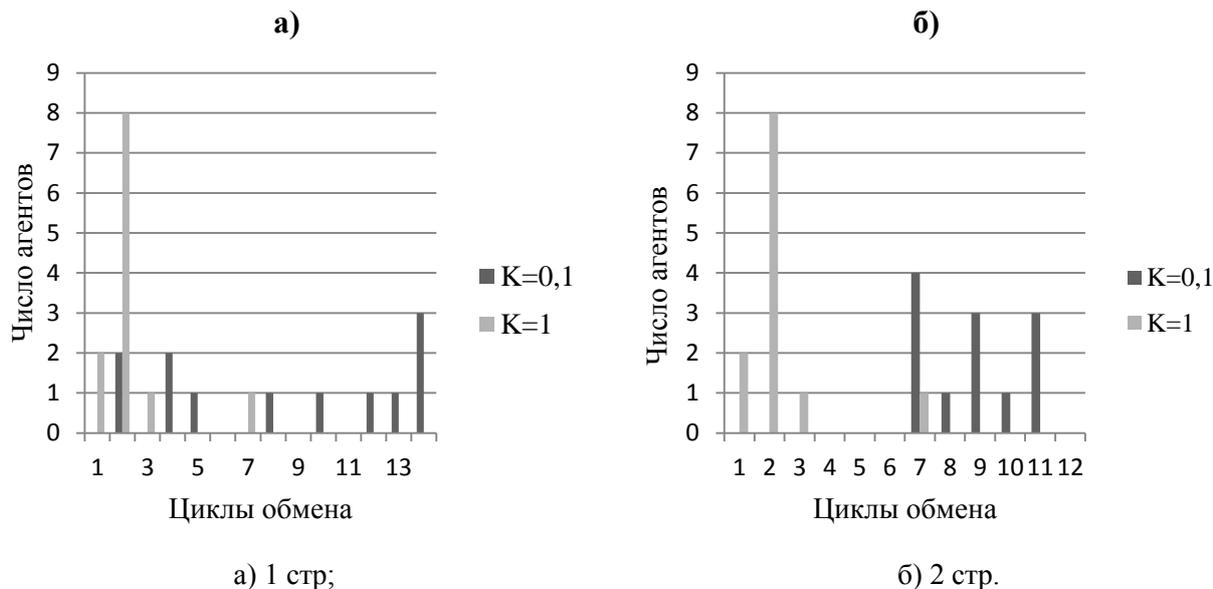
Когда денег в системе достаточно, то стратегии не влияют на продолжительность обменов отдельного агента. Агенту для обеспечения себя ресурсами необходимо такое количество циклов обмена, сколько у него ненулевых потребностей в продукции других агентов системы (при принятом в системе алгоритме совершения коммуникаций).

Длительности коммуникационного этапа для всех агентов системы при  $K=1$  приведены в табл. 7. Длительность коммуникационного этапа всей системы равна 7 циклам – максимальному количеству ненулевых элементов в векторах потребностей ( $\vec{W}_i$ ).

Таблица 7. Длительности коммуникационного этапа для агентов при  $K=1$

Номер агента	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Длительность	2	2	2	3	2	2	2	2	1	1	2	7

Если рассматривать распределение агентов, успешно завершивших обмены по циклам обмена, то можно обнаружить следующее: временной интервал завершения обменов длиннее при первой стратегии, при ней же агенты более равномерно распределены по циклам обмена. При  $K=0.1$  есть агенты, завершившие обмены во 2 цикле, последний агент завершил обмен в 14 цикле, т.е. интервал завершений равен 12 циклам; при том же значении коэффициента  $K$  и второй стратегии первые агенты завершают обмены в 6 цикле, а последний – в 13, т.е. интервал завершений равен всего 7 циклам. При  $K=1$  распределение агентов одинаковое для различных стратегий.



а) 1 стр; б) 2 стр.  
Рис. 6. Распределение успешно завершившихся обмены агентов по циклам обмена при разных значениях коэффициента  $K$  для реальной матрицы  $W$

В экспериментах с реальной матрицей  $W$  с целью минимизации времени для возобновления производства как для системы в целом, так и для каждого агента наилучшим образом проявила себя третья стратегия обмена.

Таким образом, на модели, основанной на реальных данных, были подтверждены практически все результаты, полученные для теоретических данных. Несколько слабее, чем на теоретических данных, проявил себя здесь эффект «эгоистичности» первой стратегии, заметно в основном для агентов с номерами, соответствующими первой половине системы (с 1 по 6).

## 5. Заключение

В данной работе изучалась производственная сеть функционально сопряжённых агентов, которые производят продукцию и обмениваются ей, придерживаясь при этом разных правил обмена, названных стратегией обмена. Математической основой функционирования системы является статический межотраслевой баланс Леонтьева. В системе введены финансовые ограничения в виде коэффициента обеспеченности деньгами. Управляющим параметром является указанная для агента стратегия обмена. Особенности стратегий проявляются именно в условиях финансовых ограничений.

В ходе работы были проведены эксперименты с несколькими теоретическими матрицами взаимных потребностей агентов, были выявлены определённые закономерности изменения макропараметров системы, которые затем были верифицированы на реальной матрице, полученной для небольшого муниципального образования.

Агенты действуют в условиях макроэкономических ограничений (МОБ Леонтьева), что гарантирует устойчивую работу производственной сети, но наличие в системе финансовых ограничений и поведение самих экономических агентов, определённое назначенной для них стратегией обмена, значительно влияют на характер протекающих в системе процессов и на результирующие макропараметры системы.

Дальнейшие исследования планируется проводить в двух направлениях: исследовать ещё несколько обменных стратегий, пытаясь обнаружить действительно оптимальную среди них; смоделировать открытую систему, т.е. систему, взаимодействующую с внешним потребителем.

Работа выполнена в рамках проекта ориентированных фундаментальных исследований, выполняемых в рамках соглашений о сотрудничестве УрО РАН с государственными корпо-

рациями, научно-производственными объединениями, а также в рамках реализации крупных региональных, федеральных и международных проектов № 13-27-008СГ.

## Литература

1. *Луман Н.* Социальные системы. Очерк общей теории. Пер. с нем. /Никлас Луман. – СПб.:Наука, 2007. – 668с.
2. *Попков В.В.* Экономический конструктивизм. /В.В.Попков. – М.: Книга по требованию, 2013. – 180с.
3. *Castells M.* The Rise of the Network Society. Maiden (Ma.)-Oxford, Blackwell Publishers, 1996. Перевод: М. Кастельс «Становление общества сетевых структур» // «Новая постиндустриальная волна на Западе. Антология» (под ред. В. Л. Иноземцева). М., 1999. С. 494-505. Режим доступа: <http://www.archipelag.ru/geoeconomics/soobshestva/power-identity/formation/> (дата обращения: 25.04.2014).
4. *Леонтьев В.В.* Экономические эссе. Теории, исследования, факты и политика: Пер. с англ. / В.В. Леонтьев. — М.: Политиздат, 1990. — 415 с
5. *Попков В.В., Батурич А.Н.* Оптимизационная сетевая модель экономики: топологический подход. //Труды Второй международной научно-технической конференции «Информационно-математические технологии в экономике, технике и образовании», 22-24 ноября 2007 г. Екатеринбург. С.114-135.
6. *Попков В.В.* Модели пространственного кругооборота товаров и денег: экономика фондов vs экономика продаж. // Устойчивое развитие российских регионов: инновации, институты и технологические заимствования. Материалы VII международной научно-практической конференции по проблемам экономического развития. Екатеринбург, 23 – 24 апреля 2010 г. С. 192-195.
7. *Борщев А.* Практическое агентное моделирование и его место в арсенале аналитика. //Exponenta PRO, #3-4 (7-8) 2004, с. 38–47.
8. *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.
9. ABM for Systems Biology [Электронный ресурс]. URL: <http://www.abmsystemsbiology.info/> (дата обращения: 01.08.2014).
10. *L. Tesfatsion.* Agent-Based Computational Economics [Электронный ресурс]. URL: <http://www.econ.iastate.edu/tesfatsi/ace.htm> (дата обращения: 01.07.2014).
11. *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).
12. *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).
13. *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.
14. *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.
15. *Paul L. Borrill, Leigh Tesfatsion.* Agent-Based Modeling: The Right Mathematics for the Social Sciences. //Working Paper № 10023, July, 2010.
16. *Бахтизин А.Р.* Агент-ориентированные модели экономики /А.Р. Бахтизин.– М.: ЗАО «Изд-во «Экономика», 2008. – 279 с.
17. *Shu-Heng Chen.* Varieties of Agent-Based Computational Economics: A Historical and Interdisciplinary Perspective. //Journal of Economic Dynamics & Control (2011).

18. *Giancarlo Guizzardi, Gerd Wagner. Towards an Ontological Foundation of Agent-Based Simulation. //Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference, pp.284-295.*
19. *NetLogo Home Page.* [Электронный ресурс].  
URL: <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/> (дата обращения 20.06.2013).
20. *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.*
21. *Игнатова М.А., Селезнёва Н.А., Ульянова Е.А. Муниципальная экономика: модель финансовой сети внутреннего рынка. Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 2; URL: <http://www.science-education.ru/116-12901>(дата обращения: 03.10.2014).*

*Статья поступила в редакцию 19.12.2014.*

### **Берг Дмитрий Борисович**

профессор кафедры анализа систем и принятия решений ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина», г.н.с. Института промышленной экологии УрО РАН, замдиректора по научной работе Института Александра Богданова, доктор физико-математических наук, профессор (620219, г. Екатеринбург, ГСП-594, ул. Софьи Ковалевской, 20а). e-mail: [bergd@mail.ru](mailto:bergd@mail.ru)

### **Зверева Ольга Михайловна**

старший преподаватель кафедры информационных технологий ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина» (620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19), тел. (343) 375-41-45,  
e-mail: [OM-Zvereva2008@yandex.ru](mailto:OM-Zvereva2008@yandex.ru)

### **Communications peculiarities between functionally connected agents of a production network**

**D.B.Berg, O.M.Zvereva**

In this paper, the results of communication research in the system of network structure and economic agents as its elements are delivered. The system is of a closed type as agents produce and consume goods made by themselves. Exchanges are made in volumes determined by Leontief's intersectoral balance. Communication act consists of two main parts: in the first part one agent delivers its product to another agent and in the second part money is returned as a payment for the delivered product. To investigate the communication process the simulating model using agent-oriented technology was developed. Agents use different communication strategies and this fact greatly influences system's macro-parameters. Experiments were done on the basis of simulation and real data reflecting the economic relations between the business entities of the municipality. The relationship of the duration of communication process and agents exchange strategies under the conditions of financial constraints was revealed and analyzed.

*Keywords:* communications, simulation, production network, Leontief's intersectoral balance, agent-oriented technology.