

**МНОГОАГЕНТНАЯ МОДЕЛЬ ПРОЗРАЧНОЙ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ***Редько В.Г., Сохова З.Б.**Научно-исследовательский институт системных исследований РАН*

*Построена многоагентная модель прозрачной рыночной экономической системы. Рассматривается сообщество взаимодействующих инвесторов и производителей. Путем компьютерного моделирования продемонстрирована естественная динамика капитала инвесторов и производителей. Разработанная модель может служить опорной схемой будущих исследований честной рыночной экономики.*

**Ключевые слова:** многоагентные модели, конкуренция, легкие агенты-посланники

**Введение**

Данная работа является развитием работы [1], в которой была предложена модель взаимодействия агентов инвесторов и производителей в среде прозрачной экономической системы. Предлагаемый в настоящей модели метод основан на подходе работ [2, 3], в которых использовались легкие агенты-посланники (аналоги искусственных муравьев) для оптимизации работы производственного цеха и маршрутизации движения автомобилей в городе.

В настоящей работе легкие агенты используются для оптимизации функционирования сообщества инвесторов и производителей. Эти агенты-посланники (агенты-разведчики и агенты намерений) используются для обмена информацией между инвесторами и производителями внутри сообщества. В отличие от других работ по многоагентным экономическим моделям (см., например, [4]) рассматривается упрощенное экономическое сообщество, состоящее только из инвесторов и производителей, что позволяет построить и проанализировать модель достаточно четко. В этом обществе имеется конкуренция, которая может приводить к вымиранию тех или иных инвесторов и/или производителей, что характерно для рыночной экономики. Тем не менее, хотя экономика и рыночная, экономические характеристики каждого из субъектов сообщества открыты для всего сообщества и взаимодействие между субъектами четко определено.

Учитывая открытость, четкость и конкурентность, используемые в модели, а также минимальность сделанных предположений, представленную схему можно рассматривать как опорную модель честной рыночной экономической системы.

**Общие положения модели**

Полагаем, что имеется сообщество, состоящее из  $N$  инвесторов и  $M$  производителей, каждый из которых имеет определенный капитал  $K_{inv}$  и  $K_{pro}$ . Инвесторы и производители функционируют в среде прозрачной экономики, т.е. предоставляют всему сообществу информацию о своем текущем капитале и прибыли. Имеются периоды функционирования сообщества. Например, каждый период может быть равен одному году. Далее  $T$  – номер периода.

В начале каждого периода  $T$  отдельный инвестор делает вклад в  $m$  производителей. В конце периода производитель возвращает каждому инвестору капитал, вложенный инвестором, а также распределяет полученную им прибыль между инвесторами пропорционально их вкладам, при этом определенная доля прибыли остается у производителя.

В конце  $T$ -1-го периода каждый инвестор принимает решение: какой капитал вложить в того или иного производителя в следующий  $T$ -й период. Для того чтобы принять решение с учетом намерений других инвесторов организуется итеративный процесс, который подробно описан ниже.

Необходимо подчеркнуть, что сходимость итеративного процесса заранее не очевидна. Отдельный инвестор учитывает намерения других инвесторов вложить некоторую долю своего капитала в того или иного производителя. Причем намерения инвесторов вполне могут меняться от итерации к итерации. Следовательно, итеративный процесс – это процесс коллективной самоорганизации в сообществе инвесторов и производителей. Поэтому при компьютерном моделировании специально

была проведена проверка сходимости итерационного процесса.

### Принципы функционирования сообщества производителей и инвесторов

Считаем, что перед началом периода  $T$   $i$ -й производитель имеет собственный исходный капитал  $C_{i0}$ . К капиталу каждого производителя добавляются вклады от инвесторов. Будем полагать, что производитель вкладывает в производство весь имеющийся у него к началу периода капитал  $C_i$ :

$$C_i = C_{i0} + \sum_{j=1}^N C_{ij}, \quad (1)$$

где  $C_{ij}$  – капитал, вложенный  $j$ -м инвестором в  $i$ -го производителя в начале периода. Считаем, что зависимость прибыли производителя от его текущего капитала нелинейная  $Pr_i(C_i)$ : прибыль мала при малом капитале  $C_i$  и достигает насыщения или очень медленно возрастает при большом  $C_i$ :  $Pr_i(C_i) = k_i F(C_i)$ , где функция  $F$  одинакова для всех производителей, а коэффициент  $k_i$  характеризует эффективность производства  $i$ -го производителя. Величины  $k_i$  в конце каждого периода случайно варьируются. При компьютерном моделировании считалось, что функция  $F(x)$  имеет вид  $F(x) = \frac{a}{1 + ax}$ , где  $a$  – положительный параметр.

В конце периода  $T$  производитель возвращает инвесторам вложенный ими капитал. Кроме того, производитель выплачивает инвесторам часть полученной им прибыли. Причем  $j$ -му инвестору отдается часть прибыли, пропорциональная сделанному им вкладу в данного производителя:

$$Pr_{ij} = k_{\text{выпл}} Pr_i(C_i) \frac{C_{ij}}{\sum_{l=1}^N C_{il}}, \quad (2)$$

где  $C_i$  – текущий капитал (в начале периода)  $i$ -го производителя,  $k_{\text{выпл}}$  – параметр, характеризующий долю выплат прибыли инвесторам,  $0 < k_{\text{выпл}} < 1$ . Сам производитель получит остальную часть своей прибыли  $Pr_i$ , равную:

$$Pr_i = (1 - k_{\text{выпл}}) Pr_i(C_i). \quad (3)$$

### Схема итеративного процесса принятия решения инвесторами

Перед началом  $T$ -го периода организуется итеративный процесс, с помощью которого инвесторы определяют, какие вклады они будут делать в производителей в период  $T$ . Итеративный процесс состоит в следующем. На первой итерации инвесторы рассылают агентов-разведчиков по всем производителям и определяют, какой капитал имеется у каждого производителя в данный момент времени. Причем на первой итерации не учитываются вклады других инвесторов в производителей. Далее инвесторы оценивают величины  $A_{ij}$ , характеризующие прибыль, ожидаемую  $j$ -м инвестором от  $i$ -го производителя в течение нового периода  $T$ . Эти величины  $A_{ij}$  равны:

$$A_{ij} = k_{\text{dist}} Pr_{ij} = k_{\text{dist}} k_{\text{выпл}} k_i F(C'_{i0}) \frac{C_{ij}}{\sum_{l=1}^N C_{il}}, \quad (4)$$

где  $C_{il}$  – капитал, вложенный  $l$ -м инвестором в  $i$ -го производителя,  $C'_{i0}$  – предполагаемый исходный капитал  $i$ -го производителя в начале следующего периода (пока без учета вкладов инвесторов),  $k_{\text{dist}} = k_+$  либо  $k_-$ ,  $k_+ > k_-$ . Положительные параметры  $k_+$ ,  $k_-$  определяют степень доверия инвестора к производителю, т.е. полагается, что степень доверия инвестора к проверенному и непроверенному производителю равна  $k_+$  и  $k_-$ , соответственно. Эти параметры учитывают то, что инвестор предпочитает проверенных им производителей. При этом на первой итерации, поскольку не учитываются вклады от других инвесторов, то в выражении (4) дробь равна 1. На следующих итерациях уже учитываются вклады других инвесторов и эта дробь становится меньше 1.

Затем инвестор ранжирует всех производителей в соответствии с величинами  $A_{ij}$  и выбирает  $m$  наиболее выгодных производителей, т.е. тех производителей, для которых величины  $A_{ij}$  больше, чем у остальных производителей. Далее  $j$ -й инвестор формирует намерение распределить весь свой капитал  $K_{inv j}$  по всем выбранным произво-

дителям, пропорционально полученным оценкам  $A_{ij}$  (для невыбранных производителей формально полагалось  $A_{ij} = 0$ ). А именно, намечается, что вклад  $j$ -го инвестора в  $i$ -го производителя  $C_{ij}$  будет равен:

$$C_{ij} = K_{invj} \frac{A_{ij}}{\sum_{i=1}^M A_{ij}}. \quad (5)$$

На второй итерации каждый инвестор с помощью агентов намерений оповещает тех производителей, которых он выбрал для инвестиций, о величине капитала, который он намеревается вложить в каждого из производителей.

На основе этих данных производители оценивают свой новый исходный капитал  $C'_{i0}$ , который они ожидают после получения капитала от всех инвесторов, т.е. у производителя формируется оценка суммы

$\sum_{j=1}^N C_{ij}$  и новая оценка своего капитала в соответствии с выражением (1).

Затем инвесторы снова высылают агентов-разведчиков ко всем производителям и оценивают новый капитал производителей  $C'_{i0}$  с учетом намерений других инвесторов. Делаются оценки прибыли, согласно выражению (4), в котором уже учитывается сумма намеченных вкладов всех инвесторов

$\sum_{l=1}^N C_{il}$ . Далее производители ранжируются, и капитал инвестора распределяется пропорционально новым полученным оценкам  $A_{ij}$ . Инвесторы снова рассылают агентов намерений, для того чтобы сообщить производителям намеченные величины вкладов.

Делается достаточно большое число таких итераций, после чего итерации заканчиваются, и инвестор принимает окончательное решение, какие вложения сделать на следующий период  $T$ . Окончательные

вклады равны величинам  $C_{ij}$ , которые инвесторы наметили на последней итерации.

В конце каждого периода  $T$  капиталы производителей пересчитываются с учетом амортизации (например, это может быть, амортизация оборудования производителя)  $K_{pro}(T+1) = k_{amr} K_{pro}(T)$ , где  $k_{amr}$  – коэффициент амортизации ( $0 < k_{amr} \leq 1$ ). Аналогично учитываются расходы инвесторов (для удобства соответствующие величины будем называть коэффициентами инфляции) и пересчитывается капитал инвесторов  $K_{inv}(T+1) = k_{inf} K_{inv}(T)$ , где  $k_{inf}$  – коэффициент инфляции ( $0 < k_{inf} \leq 1$ ).

Если капитал инвестора или производителя стал меньше определенного малого порога  $Th_{min\_inv}$  или  $Th_{min\_pro}$ , то инвестор или производитель прекращает свою деятельность. Если же капитал инвестора или производителя стал больше высокого порога  $Th_{max\_inv}$  или  $Th_{max\_pro}$ , то такой инвестор или производитель порождает «потомка», при этом «родитель» отдает потомку половину своего капитала.

### Результаты моделирования

**Параметры моделирования.** Описанная выше модель была реализована в виде компьютерной программы на языке Java. Использовались следующие параметры расчетов:

- общее число периодов в рассматриваемых процессах:  $N_T = 100$ ,
- число итераций в каждом периоде:  $k_{iter} = 20$ ,
- максимальные пороги капиталов производителей и инвесторов (превышение этих порогов приводило к делению производителя или инвестора):  $Th_{max\_pro} = 1$ ,  $Th_{max\_inv} = 1$ ,
- минимальные пороги капиталов производителей и инвесторов (если капитал становился ниже этих порогов, то соответствующий производитель или инвестор погибал):  $Th_{min\_pro} = 0,01$ ,  $Th_{min\_inv} = 0,01$ ,
- максимальное число производителей и инвесторов:  $N_{pro\_max} = 100$ ,  $N_{inv\_max} = 100$ ,
- начальное количество производителей и инвесторов:  $N_{pro\_initial} = 50$ ,  $N_{inv\_initial} = 50$ ,

- максимальное число производителей  $m$ , в которое мог вкладывать капитал инвестор, обычно полагалось  $m = 100$ ,
- доля выплат из полученной производителями прибыли инвесторам, обычно полагалось  $k_{\text{выпл}} = 0,3$ ,
- характерная величина случайной вариации коэффициентов  $k_i$ , определяющих эффективность  $i$ -го производителя:  $\Delta k = 0,5$ ,
- параметр функции  $F(x)$ , определяющей величину прибыли:  $a = 1$  или  $a = 10$ .

Начальные капиталы инвесторов и производителей, а также величины  $k_i$ , характеризующие эффективность производителей в начале расчета были случайными, равномерно распределенными в интервале  $[0,1]$ .

Для получения надежных данных при моделировании проводилось усреднение по 100 различным расчетам.

При делении производителя или инвестора «родитель» отдавал половину своего капитала «потомку». Деление осуществлялось в конце периода.

**Проверка сходимости итеративного процесса.** В модели существенно то, что в итеративном процессе вклады отдельного инвестора могут меняться от итерации к итерации в зависимости от намечаемых вкладов других инвесторов. Поэтому предварительно была проверена сходимость итеративного процесса. Зависимость конечного суммарного капитала производителей от числа итераций в каждом периоде для  $a = 1$  (параметра функции  $F(x)$ ) представлена на рис. 1. Видно, что итеративный процесс сходится в течение 10-20 итераций. Был также проведен аналогичный расчет для параметра  $a = 10$ , сходимость итеративного процесса за 20 итераций была подтверждена и в этом случае. С учетом этой проверки при расчетах полагалось, что число итераций равно 20.

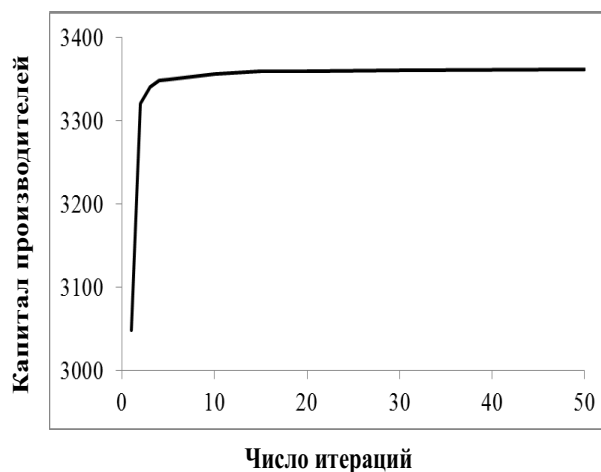


Рис. 1. Сходимость итеративного процесса ( $k_{\text{амр}} = 1, k_{\text{инф}} = 1$ ).

**Основной расчет.** Приведем результаты для расчета, в котором нет амортизации и инфляции:  $k_{\text{амр}} = 1, k_{\text{инф}} = 1$  (рис. 2).

Рис. 2 показывает, что при  $k_{\text{амр}} = 1, k_{\text{инф}} = 1$  суммарный капитал производителей и инвесторов со временем растет.

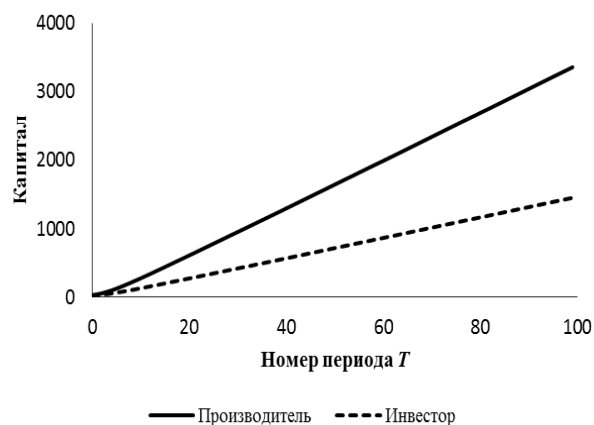


Рис. 2. Зависимость суммарного капитала производителей и инвесторов от времени (номера периода). Идеальная экономическая среда:  $k_{\text{амр}} = 1, k_{\text{инф}} = 1$ .

**Влияние амортизации капитала производителей и инфляции на моделируемые процессы.** При умеренной амортизации и инфляции суммарный капитал производителей и инвесторов со временем несколько повышается и при больших  $T$  почти не меняется (рис. 3).

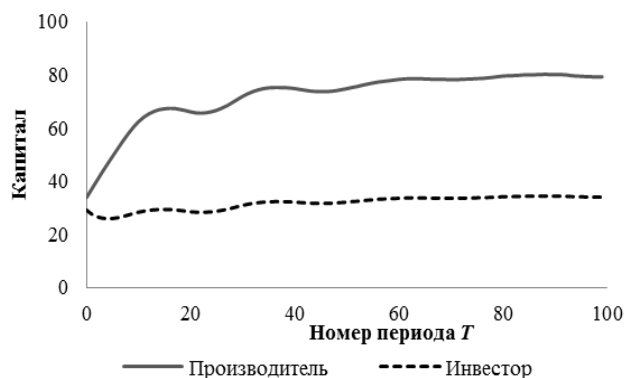


Рис. 3. Зависимость суммарного капитала производителей и инвесторов от времени. Умеренная инфляция и амортизация,  $k_{амр} = 0,8$ ,  $k_{инф} = 0,8$ .

При высокой инфляции или амортизации капитал производителей и инвесторов уменьшается, и они погибают (рис. 4).

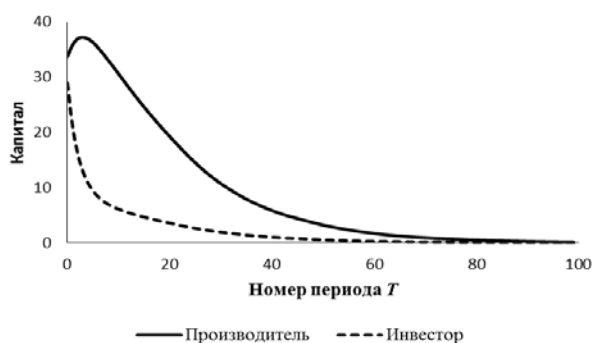


Рис. 4. Зависимость суммарного капитала производителей и инвесторов от времени,  $k_{амр} = 0,8$ ,  $k_{инф} = 0,6$ .

#### Эффективность итеративных оценок.

Для того чтобы показать, что инвесторы намного успешнее работают, если делают итеративные оценки возможной прибыли при принятии решений, для типичных параметров были проведены расчеты с итеративными оценками и без них. На рис. 5, 6 представлены результаты моделирования.

Видно, что от оценок сильно зависит как успешность инвесторов, так и успешность производителей. Суммарный капитал производителей и инвесторов намного выше в модели с итеративными оценками.

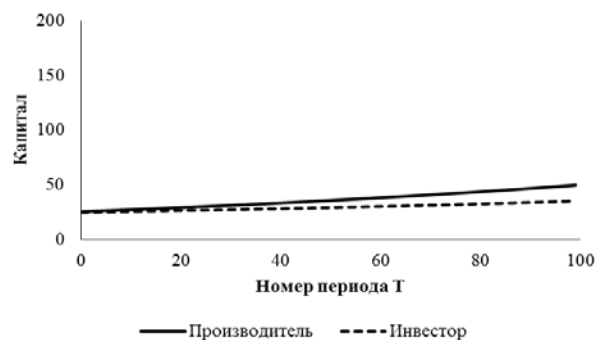


Рис. 5. Зависимость суммарного капитала производителей и инвесторов от итеративных оценок. Расчет без итеративных оценок.

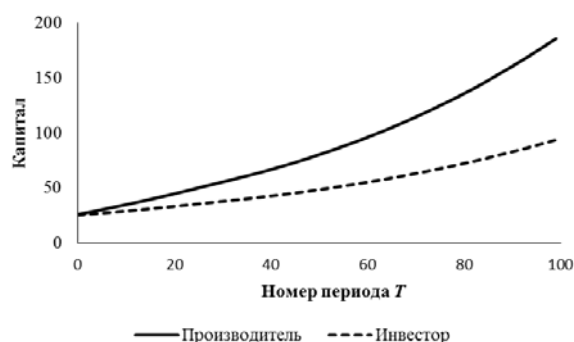


Рис. 6. Зависимость суммарного капитала производителей и инвесторов от итеративных оценок. Расчет с итеративными оценками.

**Влияние других факторов.** Кроме приведенных результатов путем численных расчетов были еще проанализированы следующие аспекты рассматриваемых процессов.

Был проведен анализ влияния числа производителей  $m$ , в которых вкладывают капитал инвесторы, на моделируемые процессы. Например, полагалось  $m = 10$  и  $m = 30$ . Сравнение этих расчетов показало, что инвесторам выгодно делать вклады в большее количество производителей, так как при больших величинах  $m$  капитал инвесторов существенно возрастал. При этом капитал производителей при изменении  $m$  менялся незначительно.

Было проанализировано влияние распределения полученного капитала между производителями и инвесторами, т.е. варьировался параметр  $k_{выпл}$ . Например, сравнивались расчеты для  $k_{выпл} = 0,1$  и  $k_{выпл} = 0,7$ .

Анализ результатов расчета показал, что когда доля выплат прибыли инвесторам мала ( $k_{\text{выпл}} = 0,1$ ), их суммарный капитал растет очень медленно и становится значительно меньше суммарного капитала производителей. Если же большая часть прибыли отдается инвесторам ( $k_{\text{выпл}} = 0,7$ ), то происходит обратная ситуация.

Также было проанализировано влияние параметра  $a$ , входящего в функцию  $F(x)$ , определяющей величину прибыли производителей. Например, кроме обычных расчетов, в которых считалось  $a = 1$ , был проведен расчет для  $a = 10$ . Было показано, что такое увеличение  $a$  приводило к более высокой дифференцировке производителей инвесторами.

### Заключение

Таким образом, построена многоагентная модель прозрачной рыночной экономики. Путем компьютерного моделирования продемонстрирована естественная динамика капитала инвесторов и производителей. Показано, что при низкой амортизации и инфляции капитал инвесторов и производителей со временем растет. Если амортизация и инфляция увеличиваются, то рост капитала замедляется, а при больших значениях амортизации и инфляции (или больших расходах субъектов экономического сообщества) капиталы инвесторов и производителей падают и они вымирают.

Проанализировано влияние перераспределения прибылей между инвесторами и производителями и других параметров модели на исследуемые процессы.

Еще раз подчеркнем, что в модели рассматривается открытый для всех субъектов экономического сообщества процесс динамики капиталов. Величины капиталов, величины прибылей всех субъектов и намерения инвесторов вложить определенный капитал в того или иного производителя открыты для всего сообщества. Причем динамика капитала четко определена. Тем не менее, имеет место конкуренция между субъектами сообщества, и в результате конкуренции инвесторы и производители могут вымирать. Поэтому представленную схему можно рассматривать как опорную

модель честной рыночной экономической системы.

Отметим, что представленная модель может рассматриваться как модель определенной конвергентной системы, сочетающей достоинства социалистической и капиталистической систем.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 13-01-00399. Авторы благодарны О.В. Редько за помощь в проведении компьютерных расчетов.*

### Литература

1. Сохова З.Б., Редько В.Г. Исследование поведения агентов-инвесторов и агентов-производителей в многоагентной модели конкурентной экономики // Искусственный интеллект: философия, методология, инновации. Сборник научных трудов. Ч.1. – М.: МГТУ МИРЭА, 2012, С. 145-149.
2. Holvoet T., Valckenaers P. Exploiting the environment for coordinating agent intentions // Environments for Multi-Agent Systems III, Lecture Notes in Artificial Intelligence, Berlin et al.: Springer. Vol. 4389, 2007. P. 51-66.
3. Claes R., Holvoet T., Weyns D. A decentralized approach for anticipatory vehicle routing using delegate multiagent systems // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2011. Vol. 12. No. 2. P. 364-373.
4. Бахтизин А.Р. Гибрид агент-ориентированной модели с пятью группами домохозяйств и CGE модели экономики России // Искусственные общества (электронный журнал). – М: ЦЭМИ РАН, 2007. Т. 2. № 2. С. 30-75.  
URL:  
<http://www.artsoc.ru/html/journal.htm>

### \*MULTIAGENT MODEL OF A TRANSPARENT ECONOMIC SYSTEM

\* работа опубликована по материалам Всероссийской конференции «Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях - 2013», которая поддерживалась журналом «Сложность. Разум. Постнеклассика».

*Red'ko V.G., Sokhova Z.B.*

*Scientific Research Institute for System Analysis,  
Russian Academy of Science, Moscow*

***Abstract***

*Multiagent model of a transparent economic system is designed. A community of interacting investors and producers is analyzed. Computer simulations demonstrate the natural dynamics of capital of investors and producers. The model can serve as a background for future studies of honest market economy.*

***Keywords:*** *agent-oriented models, competition, light agents-messengers*