

## **В.Г. РЕДЬКО, СОХОВА З.Б.**

Научно-исследовательский институт системных исследований РАН, Москва  
vgredko@gmail.com, zarema\_s@mail.ru

### **АГЕНТ-ОРИЕНТИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ ПРОЗРАЧНОЙ РЫНОЧНОЙ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ<sup>1</sup>**

Построена агент-ориентированная модель прозрачной рыночной экономической системы. Рассматривается сообщество взаимодействующих инвесторов и производителей. Продемонстрирована работоспособность модели и получены первые результаты ее исследования. Показана эффективность предложенной схемы взаимодействия между инвесторами и производителями.

***Ключевые слова:** агент-ориентированные 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. 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 однозначно определено. Поэтому такую экономическую систему можно назвать «честной рыночной экономикой».

---

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 13-01-00399

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

### 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  $F(x) = \frac{x^2}{x^2 + a^2}$ , 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

Итеративный процесс, в течение которого определяются вклады инвесторов в производителей, 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 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.

Затем инвестор ранжирует всех производителей в соответствии с величинами  $A_{ij}$  и выбирает  $m$  наиболее выгодных производителей, т.е. тех производителей, которым соответствуют большие величины  $A_{ij}$ . Далее  $j$ -й

инвестор формирует намерение распределить весь свой капитал  $K_{inv j}$  по всем выбранным производителям, 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:

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

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  $\sum_{l=1}^N C_{il}$

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 инве-

стора 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  $C_{ij}$ , полученным инвесторами 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 коэффициен-

тами 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 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  $k_{выпл} = 0,3$ ,
- 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 всюду 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.

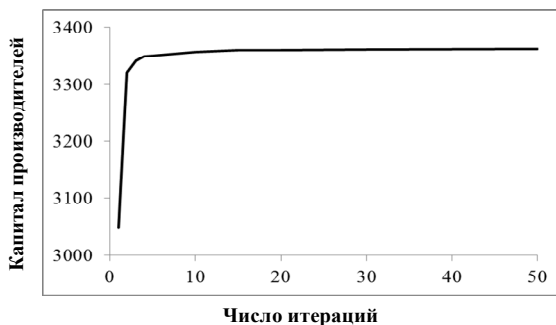


Рис. 1. Сходимость итеративного процесса ( $k_{amr} = 1, k_{inf} = 1$ )

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

Рис. 2 показывает, что при  $k_{amr} = 1, k_{inf} = 1$  суммарный капитал производителей и инвесторов со временем растет.

**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).

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

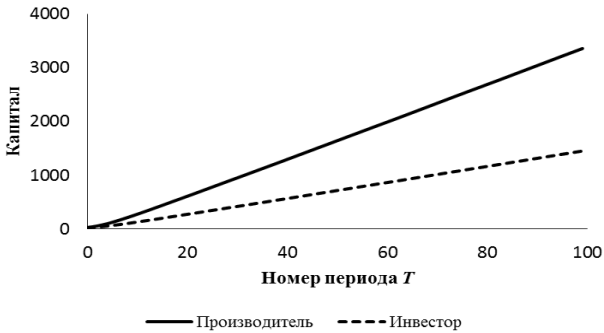


Рис. 2. Зависимость суммарного капитала производителей и инвесторов от времени (номера периода). Идеальная экономическая среда:  $k_{amr} = 1$ ,  $k_{inf} = 1$

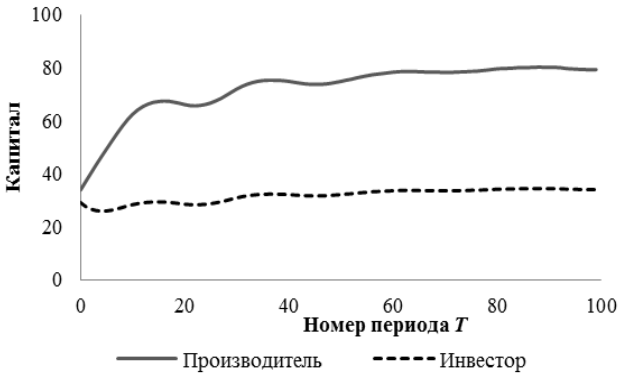


Рис. 3. Зависимость суммарного капитала производителей и инвесторов от времени. Умеренная инфляция и амортизация,  $k_{amr} = 0,8$ ,  $k_{inf} = 0,8$

**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.

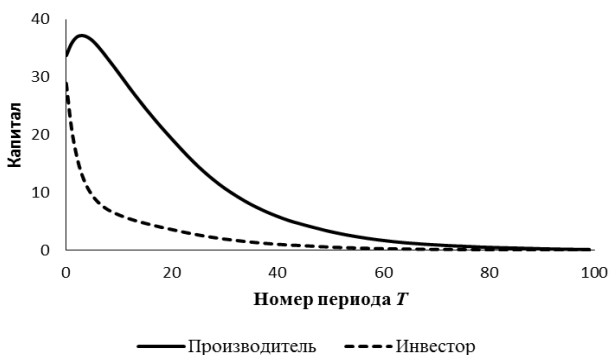


Рис. 4. Зависимость суммарного капитала производителей и инвесторов от времени,  $k_{amr} = 0,8$ ,  $k_{inf} = 0,6$

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.

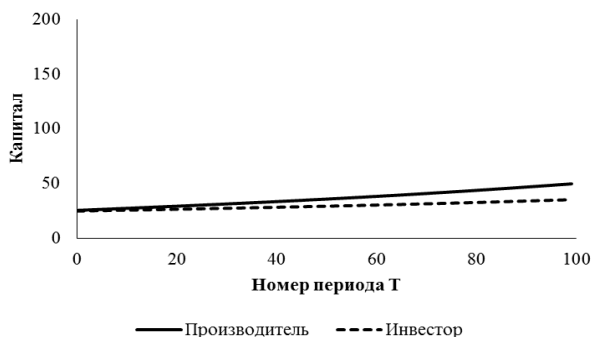


Рис. 5. Зависимость суммарного капитала производителей и инвесторов от итеративных оценок. Расчет без итеративных оценок.

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



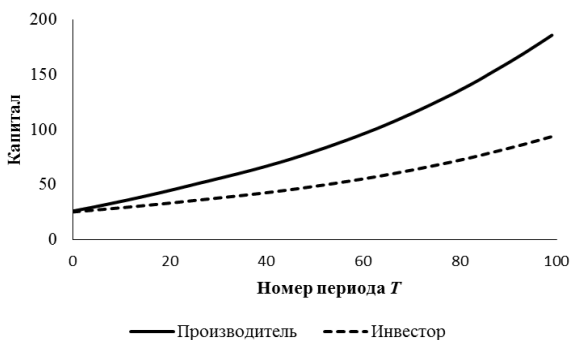


Рис. 6. Зависимость суммарного капитала производителей и инвесторов от итеративных оценок. Расчет с итеративными оценками.

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  $k_{\text{выпл}}$ . Например, сравнивались расчеты для  $k_{\text{выпл}} = 0,1$  и  $k_{\text{выпл}} = 0,7$ . Анализ результатов расчета показал, что когда доля выплат прибыли инвесторам мала, 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. Продемонстрирована работоспособность модели и полу-

чены первые результаты компьютерных экспериментов. Проанализировано влияние параметров модели на исследуемые процессы.

Авторы благодарны О.В. Редько за помощь в проведении компьютерных расчетов.

#### *Список литературы*

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., Weys 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. – М: ЦЭМИ РАН, 2007. Т. 2. № 2. С. 30-75.