

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЛЕКТИВНОГО ПОВЕДЕНИЯ АГЕНТОВ В ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ*

З.Б. СОХОВА, В.Г. РЕДЬКО

Научно-исследовательский институт системных исследований РАН
117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, корп. 1
E-mail: niisi@niisi.msk.ru

Исследуется коллективное поведение экономических агентов (инвесторов и производителей) в прозрачной экономической среде. Каждый инвестор решает задачу эффективного распределения собственного капитала между производителями с учетом действий, которые предпринимают другие инвесторы. Инвесторы и производители открыто обмениваются информацией о своих капиталах и прибылях, что позволяет сформировать децентрализованную систему коллективного взаимодействия. Показана эффективность исследованной схемы взаимодействий. Разработаны принципы построения аналогичной эволюционной модели.

Ключевые слова: инвесторы, производители, конкуренция, децентрализованная система, коллективное поведение, итеративные оценки.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящей работе построена и исследована модель коллективного поведения экономических агентов – инвесторов и производителей. Поведение коллектива агентов в условиях децентрализации исследовалось в ряде работ, в частности, в хорошо известной книге В.И. Варшавского и Д.А. Поспелова «Оркестр играет без дирижера» [1]. Важную роль сотрудничества в условиях конкуренции отмечает в своих недавних работах В.М. Полтерович [2, 3]. Формы агрессивной и конструктивной конкуренции между отдельными индивидуумами в рамках агент-ориентированного подхода анализировались в работах [4, 5]. В настоящей работе строится и исследуется конкретная модель достаточно простой экономической системы с мягкой, конструктивной конкуренцией. Модель основана на подходе работ [6, 7], в которых использовались легкие агенты-посланники для оптимизации работы производственного цеха и маршрутизации движения автомобилей в городе. В нашей работе легкие агенты используются для оптимизации функционирования сообщества инвесторов и производителей.

Производители и инвесторы могут конкурировать между собой, но тем не менее открыто обмениваются информацией о своих капиталах, в том числе инвесторы сообщают о своих намерениях вложить тот или иной капитал в определенных производителей. Обмен информацией позволяет сформировать *децентрализованную систему взаимодействий* в рассматриваемом экономическом сообществе. Важным элементом в модели является *итеративный процесс*, который помогает каждому инвестору учитывать вклады других инвесторов в производителей.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Общие положения. Полагаем, что имеется сообщество, состоящее из N инвесторов и M производителей, каждый из которых имеет определенный капитал K_{inv} и K_{pro} . Производители и инвесторы открыто обмениваются информацией между собой. В частности, производители сообщают инвесторам размеры своих капиталов и показатели

* Работа выполнена в рамках бюджетного проекта № 35.16. «Моделирование процессов формирования когнитивных способностей автономных агентов» (№ 0065-2014-0016).

эффективности своего производства, а инвесторы, имея эти сведения, формируют намерения о том, какой вклад они собираются делать в производителей. Данное намерение сообщается производителям, и они переоценивают свой капитал с учетом намерений инвесторов. Такой обмен информацией позволяет инвесторам *косвенно*, через производителей, согласовывать вклады и тем самым добиться улучшения результатов. Считаем, что вся информация, которая открыта для сообщества инвесторов и производителей, достоверна. Будем называть такую экономическую систему *прозрачной*. При компьютерном исследовании модели будет показано, что инвесторам и производителям выгодно делиться информацией.

Для того чтобы более точно провести дальнейшие рассуждения, разьясим два термина, которые используются в работе: *период времени T* и *итерация t* . Вся временная шкала в модели разделена на периоды функционирования агентов $T = 1, 2, \dots, N_T$, где N_T – количество периодов. Внутри каждого периода проводится серия итераций, которые обозначаются $t = 1, 2, \dots, t_{max}$, где t_{max} – максимальное количество итераций внутри периода.

В начале каждого периода T отдельный инвестор делает вклад в m наиболее выгодных производителей ($m \leq M$). 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 каждый инвестор принимает решение: какой капитал вложить в того или иного производителя в следующий период. Для того чтобы принять решение с учетом намерений других инвесторов, организуется итеративный процесс, который будет подробно описан ниже.

Обмен информацией между инвесторами и производителями в модели происходит с помощью агентов-посланников, аналогичных тем, которые использовались в работе [6]. Имеется два типа агентов-посланников: *агенты-разведчики* и *агенты намерений*.

Если капитал инвестора или производителя стал меньше определенного малого порога Th_{min_inv} или Th_{min_pro} , то такой 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 делится пополам, т.е. порождает «потомка», при этом «родитель» отдает потомку половину своего капитала.

Математическая модель. 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 определяется по формуле $Pr_i(C_i) = k_i F(C_i)$, 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. В данной работе считалось, что функция $F(x)$ имеет вид

$$F(x) = \begin{cases} ax, & \text{если } ax \leq Th \\ Th, & \text{если } ax > Th \end{cases}, \quad (2)$$

где a – положительный параметр, Th – порог функции $F(x)$.

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:

$$Pr_{ij} = k_{repay} Pr_i(C_i) \frac{C_{ij}}{\sum_{l=1}^N C_{il}}, \quad (3)$$

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

$$Pr_{pro_i} = (1 - k_{repay}) Pr_i(C_i). \quad (4)$$

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

$$A_{ij} = k_{dist} Pr_{ij} = k_{dist} k_{repay} k_i F(C'_{i0}) \frac{C_{ij}}{\sum_{l=1}^N C_{il}}, \quad (5)$$

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), $k_{dist} = k_{test}$ либо k_{untest} , $k_{test} > k_{untest}$. Положительные параметры k_{test} , k_{untest} определяют степень доверия инвестора производителю, т.е. полагается, что степень доверия инвестора проверенному и непроверенному производителю равна k_{test} и k_{untest} соответственно. Эти параметры учитывают то, что инвестор предпочитает проверенных им производителей. При моделировании полагалось $k_{test} = 1$, $k_{untest} = 0.5$.

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} . А именно: намечается, что вклад j -го инвестора в i -го производителя C_{ij} будет равен

$$C_{ij} = K_{inv j} \frac{A_{ij}}{\sum_{l=1}^M A_{lj}}. \quad (6)$$

Для невыбранных производителей формально полагалось $A_{ij} = 0$.

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 по всем производителям и оценивают новые капиталы производителей C'_{i0} с учетом намерений других инвесторов, а также суммы $\sum_{l=1}^N C_{il}$. Инвесторы делают оценки ожидаемой прибыли согласно выражению (5), в

котором уже учитывается сумма намеченных вкладов всех инвесторов $\sum_{l=1}^N C_{il}$. Далее каждый инвестор ранжирует производителей, и капитал инвестора распределяется пропорционально новым полученным оценкам A_{ij} согласно выражению (6). Инвесторы снова рассылают агентов намерений для того, чтобы сообщить производителям намеченные величины вкладов.

Делается достаточно большое число таких итераций, после чего итерации заканчиваются, и каждый 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 коэффициентами инфляции) и пересчитывается капитал инвесторов $K_{inv}(T+1) = k_{inf}K_{inv}(T)$, где k_{inf} – коэффициент инфляции ($0 < k_{inf} \leq 1$).

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Модель исследовалась с помощью компьютерного моделирования. Ниже приведены общие параметры моделирования, которые использовались при проведении расчетов:

- общее число периодов: $N_T = 100$ или 500 ;
- число итераций в каждом периоде: $t_{max} = 1, \dots, 50$;
- минимальные пороги капиталов производителей и инвесторов (если капитал становился ниже этих порогов, то соответствующий производитель или инвестор погибал): $Th_{min_pro} = Th_{min_inv} = 0.01$;
- максимальные пороги капиталов производителей и инвесторов (превышение этих порогов приводило к делению производителя или инвестора): $Th_{max_pro} = Th_{max_inv} = 1$;
- начальное количество производителей и инвесторов: $N_{pro_initial} = N_{inv_initial} = 50$;
- максимальное число производителей и инвесторов: $N_{pro_max} = N_{inv_max} = 100$;
- максимальное число производителей m , в которое мог вкладывать капитал инвестор, $m = 100$;
- доля выплат из полученной производителями прибыли инвесторам $k_{repay} = 0.6$;
- характерная величина случайной вариации коэффициентов k_i , определяющих эффективность i -го производителя: $\Delta k = 0.01$;
- параметр функции $F(x)$, определяющей величину прибыли: $a = 0.1$;
- порог функции $F(x)$: $Th = 100$.

Величины k_i , характеризующие эффективность производителей, исходно (в начале расчета) были случайными, равномерно распределенными в интервале $[0, 1]$.

Сходимость итеративного процесса. Исследуем сначала важный вопрос: сходится ли итеративный процесс распределения капитала? Для типичных параметров расчетов

($N_{pro_initial} = N_{inv_initial} = 50$, $N_{pro_max} = N_{inv_max} = 100$, $a = 0.1$, $Th = 100$, $Th_{max_pro} = Th_{max_inv} = 1$, $m = 100$) была проверена зависимость конечного суммарного капитала производителей и инвесторов от числа итераций в периоде. Результаты в идеальной среде, без инфляции и амортизации, представлены на рис. 1. Данные усреднены по 100 различным расчетам.

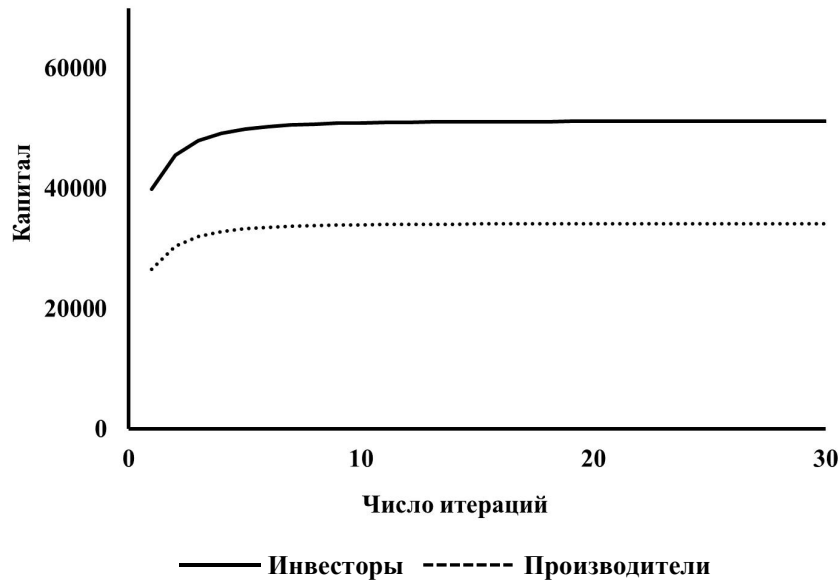
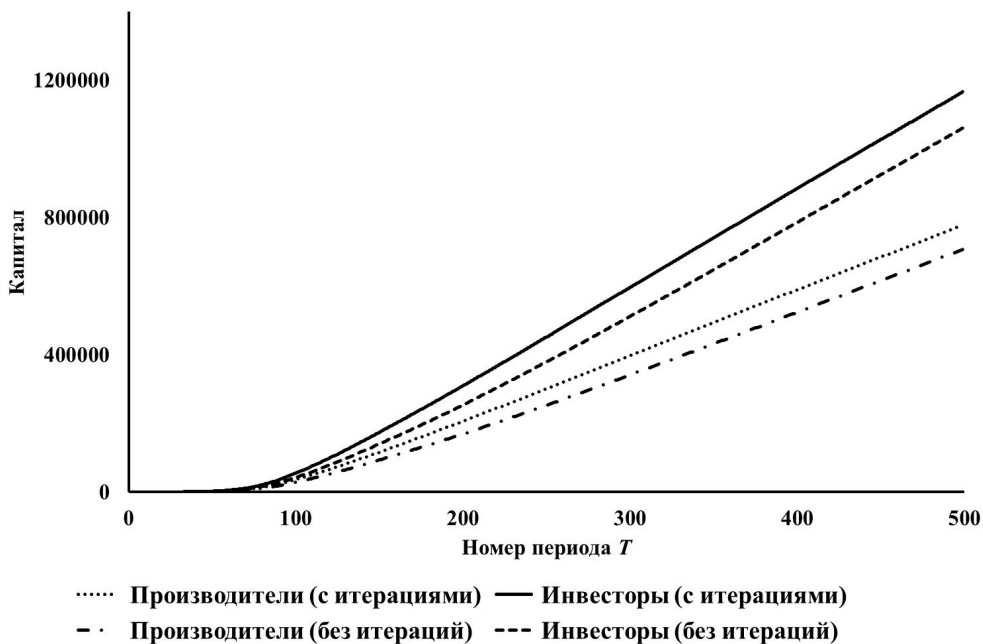


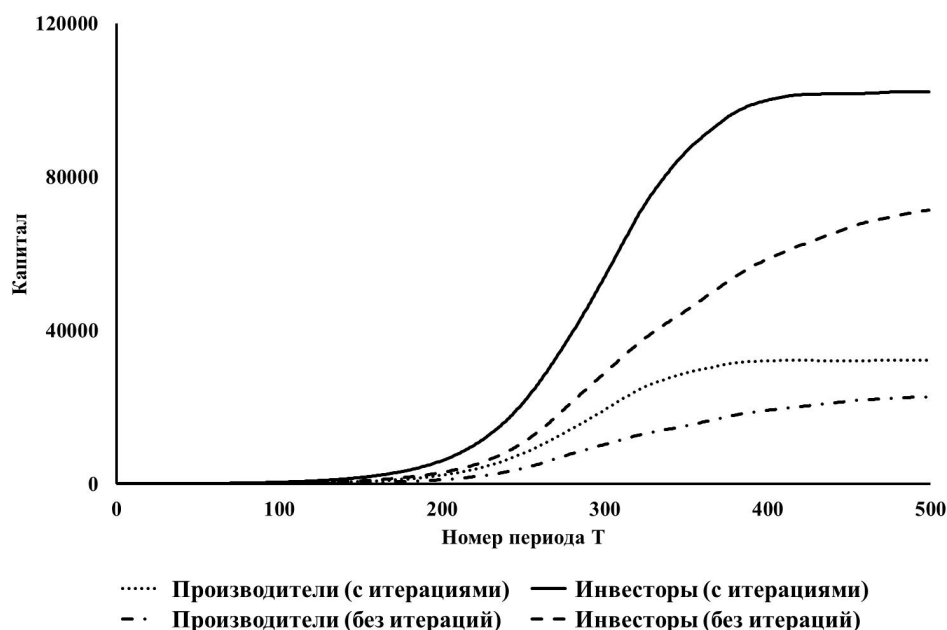
Рис. 1. Зависимость суммарных капиталов производителей и инвесторов от числа итераций

Видно, что итеративный процесс сходится. При наличии инфляции и амортизации требуется большее число итераций.

Эффективность итеративных оценок для случая $N = M = 100$. Для того чтобы показать, что инвесторы успешнее, если они взаимодействуют с другими инвесторами (т.е. если они используют итеративные оценки для определения размера своих вкладов), были проведены расчеты с итеративными оценками ($t_{max} = 50$) и без них ($t_{max} = 1$). Рассмотрим два случая: без инфляции и с инфляцией. На рис. 2 представлены результаты моделирования.



а) без инфляции и амортизации ($k_{amr} = 1, k_{inf} = 1$)



б) с инфляцией и амортизацией ($k_{amr} = 0.9; k_{inf} = 0.95$)

Рис. 2. Роль итеративных оценок.

Зависимость суммарного капитала производителей и инвесторов от времени

Видно, что от итеративных оценок зависит как успешность инвесторов, так и успешность производителей. При моделировании без инфляции и амортизации увеличение суммарных капиталов сообщества за счет итераций составило 10% (рис. 2а). В случае с инфляцией и амортизацией это влияние более существенное, суммарные капиталы производителей и инвесторов за счет итераций увеличились на 41-43% (рис. 2б).

ОПИСАНИЕ ЭВОЛЮЦИОННОЙ МОДЕЛИ

В данном разделе предлагается развитие изложенной выше модели. Введем эволюцию и обучение инвесторов. *Эволюция* включает отбор инвесторов и производителей в соответствии с их приспособленностями и мутацией. Рассматривается дарвиновская эволюция. Количество агентов от поколения к поколению не меняется (если не происходит вымирание всего экономического сообщества, см. ниже). Т.е. в новое поколение отбирается ровно столько же особей, сколько было в предыдущем. При этом особи с более высокой приспособленностью имеют большую вероятность быть отобранными. Некоторые особи могут быть отобраны в новое поколение несколько раз, это означает, что в новом поколении будет несколько потомков данной особи. Получая прибыль, инвесторы накапливают опыт и обучаются. Обучение происходит без учителя, путем настройки *степени доверия* производителям. В частности, степень доверия инвесторов к производителю плавно увеличивается в зависимости от получаемой прибыли. Соответственно у инвесторов в процессе обучения и взаимодействия с производителями будет формироваться определенное «мнение» о каждом производителе.

Опишем основные идеи, положенные в основу эволюционной модели. Пусть имеются две эволюционирующие популяции агентов, которые взаимодействуют в конкурентной среде: *агенты-инвесторы* и *агенты-производители*. Поясним более четко, как в данном случае используются временные шкалы. Эволюция в модели происходит в течение ряда

поколений, $t_g = 1, 2, \dots, T_g$, где T_g – количество поколений. Продолжительность жизни каждого поколения полагаем равной N_T тактов времени, будем называть каждый такт времени *периодом* $T = 1, 2, \dots, N$. Аналогично модели без эволюции, здесь в конце каждого периода T каждый инвестор принимает решение о вкладах, которые он будет делать в следующий период $T+1$. Для нахождения этого решения выполняется серия итераций, которые обозначаются $t = 1, 2, \dots, t_{max}$, где t_{max} – максимальное количество итераций внутри периода. Таким образом, имеем *три временные шкалы*: 1) поколения агентов (T_g), 2) периоды (N_T), 3) итерации (t_{max}). Каждое поколение агентов живет N_T периодов, в течение каждого периода выполняется t_{max} итераций, всего поколений T_g .

Пусть количество агентов в популяциях N (инвесторы) и M (производители) и каждый из агентов имеет определенный капитал K_{inv} (инвесторы) или K_{pro} (производители). Жизненный цикл агентов в *течение одного поколения* был описан выше в модели без эволюции и здесь остается таким же. Перейдем к описанию генотипа агентов.

Генотип агента и текущие степени доверия. Каждый инвестор имеет параметр, отвечающий за степень доверия к каждому производителю (в модели без эволюции это параметр k_{dist}). В эволюционной модели обозначим его d_{ij} – текущая степень доверия j -го инвестора i -му производителю. Степени доверия в начале поколения формируют генотип сообщества инвесторов $G=(g_{ij})$, $i = 1, \dots, M$, $j = 1, \dots, N$. Каждый столбец матрицы G представляет собой генотип отдельного инвестора. В начале рассматриваемого процесса эволюции генотипы g_{ij} задаются случайным образом и равномерно распределены в интервале $[0, 1]$. Генотип задается в момент рождения агента и не меняется в течение его жизни. Генотипы потомков отличаются от генотипа родителя небольшими мутациями. Таким образом, генотипы g_{ij} изменяются только посредством эволюции, а текущие степени доверия d_{ij} могут меняться от периода к периоду в **процессе обучения**. При этом в момент рождения текущая степень доверия совпадает с генотипом $d_{ij} = g_{ij}$.

Учитывая, что изменились обозначение и смысловая нагрузка степени доверия, формула (5) для расчета оценки A_{ij} меняется следующим образом:

$$A_{ij} = d_{ij} Pr_{ij} = d_{ij} k_{repair} k_i F(C'_{i0}) \frac{C_{ij}}{\sum_{l=1}^N C_{il}}, \quad (7)$$

d_{ij} – текущая степень доверия j -го инвестора i -му производителю.

В конце каждого периода T капиталы производителей и инвесторов пересчитываются с учетом амортизации и инфляции, как и в модели без эволюции. Если капитал инвестора или производителя стал меньше определенного малого порога, то такой инвестор или производитель погибает. При этом возможно уменьшение численности инвесторов и/или производителей и даже разрушение всей экономической системы.

Схема эволюции. Подробно изложим *эволюционный переход к следующему поколению*. Как было сказано выше, эволюция происходит в течение ряда поколений $t_g = 1, 2, \dots, T_g$, где T_g – количество поколений. В конце каждого поколения происходит отбор производителей и инвесторов в новое поколение в соответствии с их функциями приспособленностей $f(K_{pro})$ и $f(K_{inv})$. Будем считать, что **функция приспособленности** имеет вид **линейной функции** $f(K) = \beta K$, где β – положительный параметр интенсивности отбора, K – конечный (в конце поколения) капитал инвестора или производителя. Для отбора используется *рулеточный метод* (roulette wheel selection) или метод отбора с вероятностями, пропорциональными приспособленностям (fitness-proportionate selection) [8]. Число производителей и инвесторов при отборе остается постоянным. Сначала делается отбор производителей, а затем инвесторов. Некоторые особи могут иметь несколько «потомков». Конечный (в конце поколения) капитал «родителя» при этом делится между «потомками» поровну.

Потомками-производителями наследуется эффективность производства родителя с мутациями, т.е. $k_l(t_g + 1) = k_i(t_g) + rand_l$, где l – номер потомка в новом поколении, i – номер родителя, $rand_l$ – нормально распределенная случайная величина с нулевым средним и стандартным отклонением P_{mut} (интенсивность мутаций), которая добавляется к каждой эффективности.

Аналогично делается отбор особей инвесторов. Конечный капитал родителя инвестора делится между «потомками» поровну. Генотип родителя инвестора наследуется потомком с небольшими мутациями, $g_{il}(t_g + 1) = g_{ij}(t_g) + rand_l$, где l – номер потомка, j – номер родителя, i меняется от 1 до M , l и j фиксированы, а $rand_l$ – нормально распределенная случайная величина с нулевым средним и стандартным отклонением P_{mut} (интенсивность мутаций), которая добавляется к каждому элементу генотипа. Если величина g_{ij} или k_i в результате мутаций стала отрицательной, то она становится равной 0.

Таким образом, генотип инвесторов есть начальные степени доверия g_{ij} , генотип производителя есть его эффективность k_i , а конечный капитал инвестора или производителя K_{invj} , K_{proi} есть его фенотип. Эволюция дарвиновская, так как по наследству передаются потомкам генотипы (с малыми мутациями), а не фенотипы.

Обучение инвесторов. В течение жизни поколения инвесторы обучаются. Обучение происходит в конце каждого периода T . Получив прибыль от производителя в конце текущего периода T , инвестор пересчитывает текущие степени доверия к производителям по следующему правилу:

$$d_{ij}(T+1) = d_{ij}(T) + \alpha P_{ij}, \quad (8)$$

где α ($\alpha > 0$) – коэффициент обучения, P_{ij} – прибыль, полученная j -м инвестором от i -го производителя. Таким образом, текущая степень доверия линейно зависит от прибыли, которую инвестор получает от производителя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, исследованы принципы взаимодействия инвесторов и производителей в среде прозрачной экономической системы. Оригинальные черты модели: сотрудничество между инвесторами и производителями, открытость информации о капиталах и эффективностях производителей, а также о намерениях инвесторов вложить капиталы в тех или иных производителей, итеративный процесс формирования размеров вкладов. Наиболее важным результатом является разработка нового метода выгодного распределения капитала в конкурентной среде через сотрудничество. Разработаны принципы построения модели эволюции коллектива инвесторов и производителей, в которой инвесторы обучаются формировать степени доверия производителям.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Варшавский В.И., Поспелов Д.А.* Оркестр играет без дирижера: размышления об эволюции некоторых технических систем и управлении ими. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы. 1984. 208 с.
2. *Полтерович В.М.* От социального либерализма – к философии сотрудничества // *Общественные науки и современность.* 2015. № 4. С. 41-64.
3. *Полтерович В.М.* Позитивное сотрудничество: факторы и механизмы эволюции // *Вопросы экономики.* 2016. № 11. С. 5-23.

4. Редько В.Г., Бурцев М.С., Сохова З.Б., Бесхлебнова Г.А. Моделирование конкуренции при эволюции многоагентной системы // Искусственные общества (электронный журнал). 2007. Т. 2. № 2. С. 76-89. URL: <http://abm.center/magazine/?ID=44>
5. Burtsev M., Turchin P. Evolution of cooperative strategies from first principles. Nature. 2006. Vol. 440. No. 7087. PP. 1041-1044.
6. 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. PP. 364-373.
7. Holvoet T., Valckenaers P. Exploiting the environment for coordinating agent intentions. In: Environments for Multi-Agent Systems III, Lecture Notes in Artificial Intelligence, Springer: Berlin et al. (2007). Vol. 4389. PP. 51-66.
8. Редько В.Г. Моделирование когнитивной эволюции. М.: Ленанд. 2015. 256 с.

INVESTIGATION OF COLLECTIVE BEHAVIOR OF AGENTS IN THE DECENTRALIZED ECONOMIC SYSTEM

Z.B. SOKHOVA, V.G. RED'KO

Scientific Research Institute for System Analysis, Russian Academy of Sciences
Russia, 117218, Moscow, Nakhimovsky prospect, 36, building 1
E-mail: niisi@niisi.msk.ru

The collective behavior of economic agents (investors and producers) in a transparent economic environment is investigated. Each investor solves the problem of efficient distribution of its capital among producers taking into account the contributions of other investors into producers. Investors and producers openly exchange information about their capital and profits, which allows to form a decentralized system of collective interaction. The efficiency of the investigated scheme of interactions is shown. The principles of constructing an analogous evolutionary model are developed.

Keywords: investors, producers, competition, decentralized system, self-organization, collective behavior, iterative estimation.

Работа поступила 12.11.2017 г.