

Моделирование поиска инвестиционных решений автономными агентами в прозрачной конкурентной экономике*

З. Б. Сохова, В. Г. Редько

Федеральный научный центр «Научно-исследовательский институт системных исследований» РАН, Москва, Россия

Аннотация. В работе рассматриваются подходы к исследованию поиска решений автономными агентами в конкурентной среде. Исследование проведено на основе модели прозрачной экономической системы. Рассматривается взаимодействие внутри сообщества инвесторов и производителей, которые открыто обмениваются информацией между собой. Излагается базовая модель взаимодействия. Предложены и исследованы две специальные модели для исследования процессов, происходящих в реальной экономике: модель с «открытой» монополией и модель «нечестной» конкуренции.

Ключевые слова: автономные агенты, децентрализованная система, обмен информацией, прозрачная экономика, сотрудничество, конкуренция.

DOI 10.14357/20718594190210

Введение

В последние годы в искусственном интеллекте активно развивается направление исследований – «многоагентные системы». В многоагентной системе группа автономных агентов действует в среде для достижения общих или своих индивидуальных целей. Эти агенты могут сотрудничать или конкурировать друг с другом, делиться или не делиться информацией [1, 2]. Важный вопрос, который исследуется в настоящее время в многочисленных исследованиях – возможность сотрудничества в конкурентных средах [3-5]. Например, известный экономист В. М. Полтерович обращает особое внимание на возрастающую роль сотрудничества [4, 5]. Конкуренция при этом рассматривается как «механизм повышения эффективности сотрудниче-

ства». Формы агрессивной и конструктивной конкуренции между отдельными индивидуумами в рамках агент-ориентированного подхода анализировались также в работе [6]. В близкой, но другой трактовке, коллективное поведение элементов экономических систем в условиях децентрализации представлено в работе В. И. Варшавского и Д. А. Поспелова [7].

В данной работе характеризуется достаточно простая экономическая система с мягкой, конструктивной конкуренцией. Определенным прототипом нашей модели служат работы бельгийских исследователей [8, 9], в которых использовались легкие агенты-посланники для оптимизации работы производственного цеха и маршрутизации движения автомобилей в городе. В нашей работе мы используем общую схему обмена информацией между агентами, предложенную в работах [8, 9].

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ грант № 19-01-00331.

✉ Сохова Зарема Борисовна. E-mail: zarema.sokhova@gmail.com

Рассматриваемое экономическое сообщество состоит только из инвесторов и производителей. Несмотря на то, что присутствует конкуренция, участники сообщества открыто обмениваются информацией. Данная работа является развитием базовой модели, предложенной в наших исследованиях [10-12]. Ключевая особенность базовой экономической многоагентной модели – *прозрачность* и *децентрализация*, которые обеспечивают возможность выгодного сотрудничества между инвесторами и производителями. Основные агенты в базовой модели экономической системы – это агенты-производители и агенты-инвесторы. Основные агенты обмениваются информацией с помощью легких агентов-посланников, причем в базовой модели эта информация полностью достоверна.

В данной работе проведены новые исследования базовой модели для определенной функции прибыли производителей. Кроме этого, построены и исследованы две специальные модели, разработанные на основе базовой модели: с «открытой» монополией и «нечестной» конкуренции между инвесторами. В модели с «открытой» монополией предполагается, что в экономической системе могут возникать производители, эффективность производства у которых намного выше, чем у других производителей. Модель «нечестной» конкуренции между инвесторами предполагает, что нечестные инвесторы могут сообщать сообществу недостоверную информацию о своих предполагаемых вкладах в производителей.

Статья построена следующим образом. В Разделе 1 кратко излагается базовая экономическая многоагентная модель. В Разделе 2 приводятся новые результаты исследования базовой модели. В Разделе 3 показана модель с «открытой» монополией и результаты ее исследования. В Разделе 4 излагаются принципы построения и результаты исследования модели «нечестной» конкуренции между инвесторами. Исследования моделей проводились путем компьютерного моделирования с использованием языка Java.

1. Базовая модель поиска решений

автономными агентами

1.1. Основные положения

Опишем базовую модель поиска решений автономными агентами. Рассматривается взаимодействие двух сообществ агентов: *агентов-*

инвесторов и *агентов-производителей*. Пусть число агентов в популяциях равно N (число инвесторов) и M (число производителей) и каждый из агентов имеет определенный капитал K_{inv} (инвесторы) и K_{pro} (производители). Изложим подробнее жизненный цикл сообществ агентов.

В модели будем использовать следующие обозначения: j – номер инвестора, $j = 1, \dots, N$, i – номер производителя, $i = 1, \dots, M$. Агенты функционируют в течение N_T периодов. Например, один период T может быть равен одному году. В конце каждого периода T инвесторы принимают решение о капиталовложениях, которые они будут 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 *две временные шкалы*: 1) периоды (число периодов равно N_T), 2) итерации (число итераций равно t_{max}). В течение каждого периода агенты обмениваются информацией. Для обмена информацией используются легкие агенты: *агенты-разведчики* и *агенты намерения*, аналогичные тем, которые использовались в [8].

В начале каждого периода T отдельный инвестор делает капиталовложения в производителей. В конце периода производитель возвращает каждому инвестору капитал, вложенный инвестором, а также распределяет часть полученной им прибыли между инвесторами пропорционально их капиталовложениям. При этом определенная доля прибыли остается у производителя. В конце периода T 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.

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

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

где C_{i0} – собственный капитал производителя; 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: $P_i(C_i) = k_i F(C_i)$, где функция F одинакова для всех производителей, а коэффициент k_i характеризует эффективность производства i -го производителя. В данной работе считалось, что функция $F(x)$ линейно-пороговая и 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 капиталовложению в данного производителя:

$$P_{inv\ ij} = k_{repa} P_i(C_i) \frac{C_{ij}}{\sum_{l=1}^N C_{il}}, \quad (3)$$

где C_i – текущий капитал (в начале периода) i -го производителя; k_{repa} – параметр, характеризующий долю прибыли, которая выплачивается инвесторам, $0 < k_{repa} < 1$. Сам производитель получит остальную часть своей прибыли P_i , равную:

$$P_{pro\ i} = P_i(C_i) - \sum_{j=1}^N P_{inv\ ij}. \quad (4)$$

1.2. Схема итеративного процесса принятия решения инвесторами

Итеративный процесс, в течение которого определяются капиталовложения 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. При этом на первой итерации не учитываются капиталовложения 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:

$$A_{ij} = d_{ij} P_{inv\ ij} = d_{ij} k_{repa} k_i F(C'_{i0}) \frac{C_{ij}}{\sum_{l=1}^N C_{il}}, \quad (5)$$

где d_{ij} – текущая степень доверия j -го инвестора к i -му производителю; 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 капиталовложений инвесторов); k_{repa} – доля выплат инвесторам.

Текущая степень доверия d_{ij} равна d_{test} либо d_{untest} , $d_{test} > d_{untest}$. Положительные параметры d_{test} , d_{untest} определяют степень доверия инвестора к производителю, т.е. полагается, что степени доверия инвестора к проверенному и непроверенному производителю равны d_{test} и d_{untest} , соответственно. Эти параметры учитывают то, что инвестор предпочитает проверенных им производителей. При компьютерном моделировании полагалось $d_{test} = 1$, $d_{untest} = 0.5$.

Затем j -й инвестор формирует намерение распределить весь свой капитал $K_{inv\ j}$ по производителям, пропорционально полученным оценкам A_{ij} . А именно, намечается, что капиталовложение j -го инвестора в i -го производителя C_{ij} будет равно:

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

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} (уже 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 капиталовложений всех инвесторов $\sum_{i=1}^N C_{ii}$. Далее каждый инвестор формирует новое намерение распределить свой капитал пропорционально *новым полученным оценкам* A_{ij} согласно выражению (6). Инвесторы снова рассылают агентам намерений для того, чтобы сообщить производителям новые намеченные величины капиталовложений.

Делается достаточно большое число таких итераций, после чего итерации заканчиваются, и каждый инвестор принимает окончательное решение: какие вложения сделать на следующий период $T+1$. Окончательные капиталовложения 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 ($0 < k_{inf} \leq 1$).

Если капитал инвестора или производителя в конце периода становится больше определенного порога Th_{max_inv} или Th_{max_pro} , и численность агентов в сообществе меньше максимально возможной, то такой инвестор или производитель может делиться. При делении производителя или инвестора «родитель» отдавал половину своего капитала «потомку». Производитель-«родитель» передавал по наследству свою эффективность k_i . Инвестор-«потомок» наследовал факторы доверия d_{ij} инвестора-«родителя». Фактор доверия d_{ij} к «потомку» производителя устанавливался равнымначальному 0.5, так как вкладов в него еще не было.

Если капитал инвестора или производителя стал меньше определенного малого порога Th_{min_pro} или Th_{min_inv} , то такой инвестор или производитель погибает. При этом возможно уменьшение численности инвесторов и/или производителей и даже разрушение всей экономической системы.

1.3. Схема компьютерного моделирования

Описанная выше модель исследована с помощью компьютерного моделирования. Сначала будет представлен анализ результатов моделирования для базовой модели, затем – рассмотрены два специальных случая: модель с «открытой» монополией и модель с нечестной конкуренцией.

Перечислим общие основные входные параметры моделирования, которые влияют на процессы, происходящие в исследуемых моделях: 1) число независимых расчетов, по которым проводится усреднение N_{runs} ; 2) общее число периодов N_T ; 3) число итераций в каждом периоде t_{max} ; 4) минимальные пороги капиталов производителей и инвесторов Th_{min_pro} , Th_{min_inv} ; 5) максимальные пороги капиталов производителей и инвесторов Th_{max_pro} , Th_{max_inv} ; 6) начальное количество производителей и инвесторов M_0 , N_0 ; 7) максимальное количество производителей и инвесторов в каждом периоде M_{max} , N_{max} ; 8) количество производителей, в которых делается капиталовложение m ; 9) доля выплат из полученной производителями прибыли инвесторам k_{repay} ; 10) параметр функции $F(x)$, определяющей величину прибыли, a ; 11) порог линейно-пороговой функции $F(x)$ Th ; 12) коэффициент амортизации для производителей k_{amr} ; 13) коэффициент инфляции для инвесторов k_{inf} .

Капиталы агентов в модели измерялись в условных единицах. Величины k_i , характеризующие эффективность производителей, исходно (в начале расчета) были случайными, равномерно распределенными в интервале $[0, 1]$ (кроме модели с «открытой» монополией). Начальные капиталы инвесторов и производителей исходно были случайными и равномерно распределены в интервале $[0, 1]$.

2. Исследование базовой модели с линейно-пороговой функцией прибыли

В [12] были получены результаты моделирования рассматриваемой модели для нелинейной функции прибыли $F(x) = x^2(a^2 + x^2)^{-1}$. В данной работе приводятся результаты исследования базовой модели для линейно-пороговой функции вида (2).

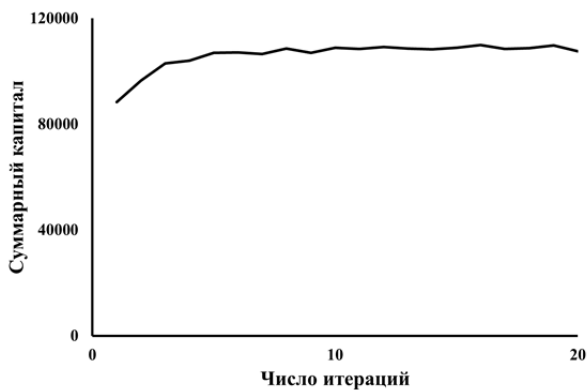


Рис. 1. Зависимость суммарного капитала производителей и инвесторов от числа итераций
Без инфляции и амортизации ($k_{amr} = k_{inf} = 1.0$),
 $k_{repa} = 0.5$, $T = 100$

Параметры моделирования были следующие: $N_{runs} = 100$; $N_T = 100$; $t_{max} = 10$; $Th_{min\ pro} = Th_{min\ inv} = 0.01$, $Th_{max\ pro} = 1.0$, $Th_{max\ inv} = 1.0$, $M_0 = N_0 = 50$; $M_{max} = N_{max} = 100$; $m = 100$; $k_{repa} = 0.5$ или 0.6 ; $a = 0.1$; $Th = 100$, характерная величина случайной малой вариации коэффициента эффективности производителей k_i при переходе от периода к периоду $\Delta k = 0.01$.

Важный вопрос, который возникает при моделировании – сходимость итерационного процесса. Поэтому была проверена зависимость конечного суммарного капитала производителей и инвесторов от числа итераций в каждом периоде. Результаты в идеальной среде, без инфляции и амортизации, представлены на Рис. 1. Данные усреднены по 100 различным расчетам.

Видно, что итеративный процесс сходится достаточно быстро. При сравнении результатов моделирования, полученных при $t_{max} = 1$ и $t_{max} = 10$, было найдено, что наличие итераций приводит к увеличению суммарного капитала инвесторов на 23%. С учетом данной проверки количество итераций t_{max} равнялось 10 во всех дальнейших экспериментах: $t_{max} = 10$.

Следующий вопрос, который был рассмотрен: как изменяется средний коэффициент эффективности k_i сообщества производителей. Результаты, представленные на Рис. 2, демонстрируют динамику среднего коэффициента эффективности производителей для двух случаев: без амортизации и инфляции ($k_{amr} = k_{inf} = 1.0$, $k_{repa} = 0.5$) и с амортизацией и инфляцией ($k_{amr} = k_{inf} = 0.95$, $k_{repa} = 0.6$). Несущественное уменьшение средней эффективно-

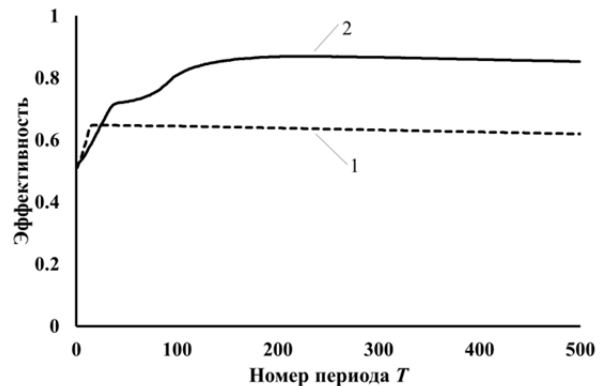


Рис. 2. Динамика среднего коэффициента эффективности производителей k_i

сти сообщества производителей при моделировании (линии 1 и 2 на Рис. 2) связано с вариацией коэффициента эффективности при переходе от периода к периоду.

Видно, что, когда амортизации нет, увеличение эффективности небольшое, если же присутствует амортизация, эффективность значительно выше. Причиной этого является то, что численность сообществ ограничена сверху, новые производители и инвесторы могут появиться только в том случае, если порог численности не достигнут. Поэтому, когда присутствует амортизация, менее эффективные производители прекращают свою деятельность, так как не могут справиться с амортизацией и инфляцией. При этом появляется возможность деления для более эффективных производителей. Они в свою очередь передают потомкам свою эффективность, и общая средняя эффективность сообщества производителей увеличивается.

Перейдем к следующему важному результату. Для того чтобы показать, что инвесторы успешнее, если взаимодействуют с другими инвесторами (т.е. если они используют итеративные оценки для определения размера своих капиталовложений), для типичных параметров были проведены расчеты с итеративными оценками ($t_{max} = 10$) и без них ($t_{max} = 1$).

Рассмотрим два случая: без инфляции и амортизации и с инфляцией и амортизацией. На Рис. 3 представлены результаты моделирования, усредненные по 100 различным расчетам. Причем при наличии амортизации и инфляции влияние итеративных оценок значительнее.

Итак, в рамках базовой модели продемонстрирована важная роль итеративного процесса и

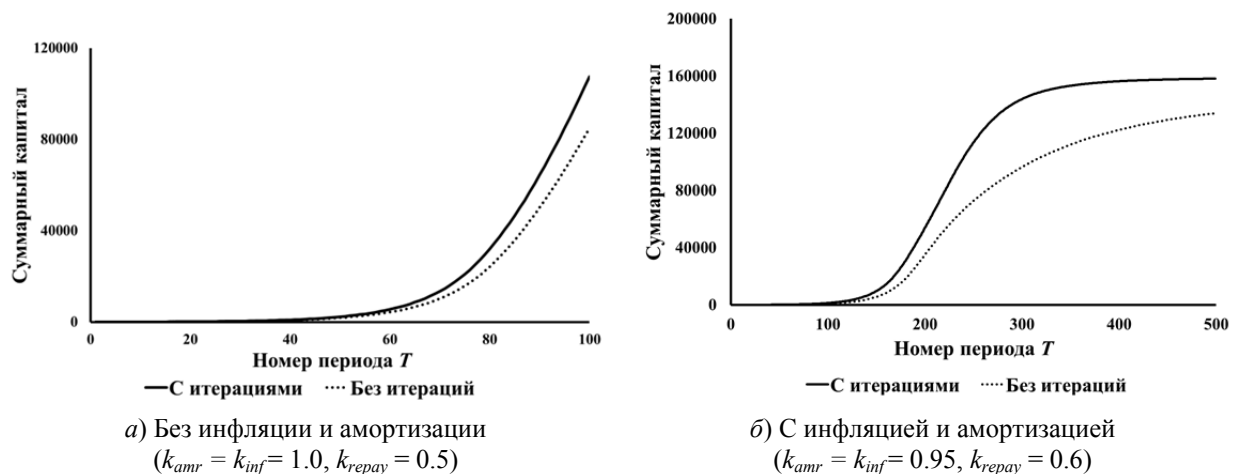


Рис. 3. Роль итеративных оценок

Зависимость суммарного капитала производителей и инвесторов от времени

обмена информацией между инвесторами и производителями при итерациях для развития экономического сообщества. При наличии итераций капитал сообщества существенно возрастает.

3. Модель с «открытой» монополией

Рассмотрим теперь специальные случаи, которые можно построить на основе базовой модели. Построим сначала модель с «открытой» монополией, в которой возможно появление «производителя-монополиста» с большой эффективностью, значительно превышающей эффективность остальных производителей. В отличие от чистой монополии, где для монополиста нет конкурентов, в случае «открытой» монополии у него могут позже появиться конкуренты на рынке. Поэтому возникает вопрос: как будет меняться состав сообщества производителей в случае «открытой» монополии. Итак, модифицируем базовую модель следующим образом.

Пусть в определенный момент времени в сообществе производителей появляется производитель с эффективностью намного больше, чем у всех остальных. В частности, при моделировании для этого случая полагалось, что эффективности всех производителей в начале функционирования сообщества составляли $k_i = 0.1$, для всех $i = 1, \dots, M$, а в период $T = 20$ в сообществе появляется производитель с эффективностью, равной $k_i = 1.0$. Номер i этого производителя случаен. Можно предположить, что данный производитель ввел в производство

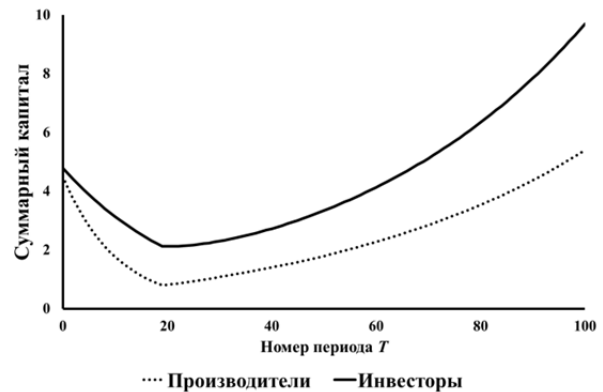


Рис. 4. Зависимость суммарного капитала инвесторов и производителей от времени

 С инфляцией и амортизацией ($k_{amr} = 0.90$, $k_{inf} = 0.95$)

какие-либо инновации, что усилило его конкурентоспособность. Очевидно, что в таком случае инвесторы будут вкладывать весь свой капитал в этого производителя.

Проанализируем результаты, полученные при моделировании. Параметры моделирования были следующие: $N_T = 300$; $t_{max} = 10$; $Th_{min\ pro} = Th_{min\ inv} = 0.01$; $Th_{max\ pro} = 10.0$; $Th_{max\ inv} = 10.0$; $M_0 = N_0 = 10$; $M_{max} = N_{max} = 20$; $m = 20$; $k_{repay} = 0.5$; $a = 0.1$; $Th = 100$. Данные усреднены по 1000 различным расчетам. На Рис. 4 видно, что суммарные капиталы сообществ сначала уменьшаются, а потом начинают увеличиваться. Увеличение связано с появлением при $T = 20$ в сообществе производителя-монополиста. Инвесторы начинают делать капиталовложения в него, и суммарный капитал сообществ начинает расти.

При этом, как показано на Рис. 5, количество производителей постепенно уменьшается. Это означает, что те производители, которые не эффективны, прекращают свою деятельность. При $T \approx 100$ капитал производителя-монополиста достигает порога $Th_{max\ pro}$ (соответствующего условию деления производителя), и этот производитель начинает делиться. Потомки этого производителя имеют высокие значения эффективности k_i . Таким образом, неэффективные производители постепенно замещаются эффективными. Вскоре после этого аналогично начинают делиться и инвесторы.

Рис. 6 показывает, что в результате средний коэффициент эффективности тоже растет, и достигает достаточно высокого уровня, близкого к максимальной эффективности производителей $k_{max} = 1.0$. Как и в базовой модели, несущественное уменьшение средней эффективности сообщества производителей при $T > 60$ связано с вариацией коэффициента эффективности при переходе от периода к периоду.

Таким образом, можно сделать вывод, что при «неэффективной» экономике, появление эффективной инновации хотя бы у одного производителя положительно влияет на динамику капиталов. У сообщества появляется шанс выжить. В противном случае все сообщество перестает функционировать и экономическая система разрушается.

4. Модель «нечестной» конкуренции

Рассмотрим теперь следующий вариант модели. В базовой модели полагалось, что все инвесторы, сообщая производителям свои намерения о капиталовложениях, делятся только достоверной информацией. Исследуемый ниже случай показывает, как поменяется динамика капиталов сообществ, если в модели будут «нечестные» инвесторы.

Пусть имеется N инвесторов и M производителей. Инвесторы делают капиталовложения в m производителей. Будем полагать теперь, что не все инвесторы сообщают производителям достоверную информацию о своих капиталовложениях. А именно, инвесторы, как и в базовой модели, рассчитывают оценки согласно (5) и формируют намерения сделать капиталовложения по формуле (6). Инвесторы сообщают размеры этих намеченных капиталовложений производителям. Производители, в свою

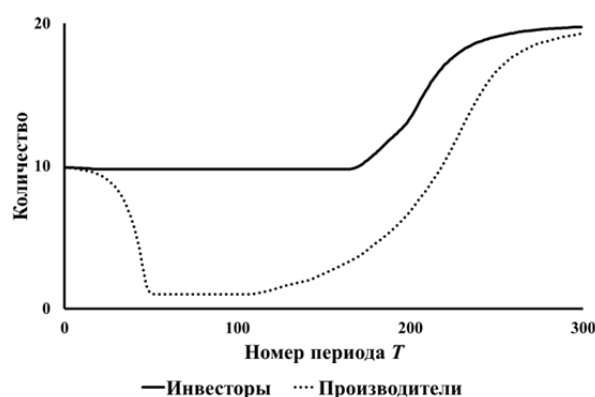


Рис. 5. Зависимость количества инвесторов и производителей от времени
С инфляцией и амортизацией ($k_{amr} = 0.9$, $k_{inf} = 0.95$)

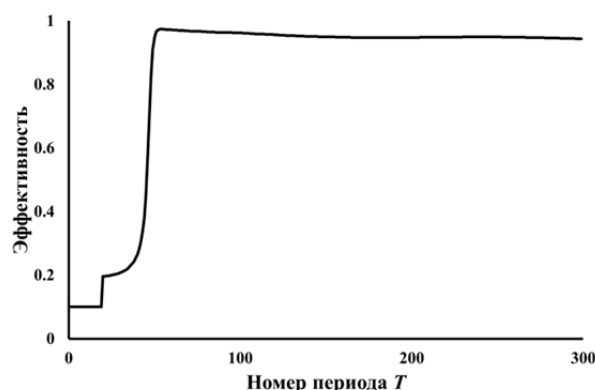


Рис. 6. Динамика среднего коэффициента эффективности производителей
С инфляцией и амортизацией ($k_{amr} = 0.9$, $k_{inf} = 0.95$)

очередь, пересчитывают свои капиталы с учетом этих намерений. Но в отличие от базовой модели в этом варианте после итераций «нечестные» инвесторы делают капиталовложения только в одного производителя: того, который имеет наибольшую оценку A_{ij} (выражение (5)), а не в m производителей.

В рамках данной модели были проведены компьютерные эксперименты для трех режимов: 1) все инвесторы «честные» (т. е. делают капиталовложения во всех намеченных производителях как в базовой модели), 2) все инвесторы «нечестные», 3) половина инвесторов «нечестная».

Основные параметры моделирования следующие: $N_{runs} = 100$; $N_T = 1000$; $t_{max} = 10$; $Th_{min\ pro} = 0.01$; $Th_{min\ inv} = 0.01$; $Th_{max\ pro} = 1.0$; $Th_{max\ inv} = 1.0$; $M_0 = N_0 = 10$; $M_{max} = N_{max} = 20$; $m = 20$; $k_{repat} = 0.5$; $a = 0.1$; $Th = 100$. На Рис. 7 представлена динамика суммарных капиталов инвесторов для трех исследуемых режимов

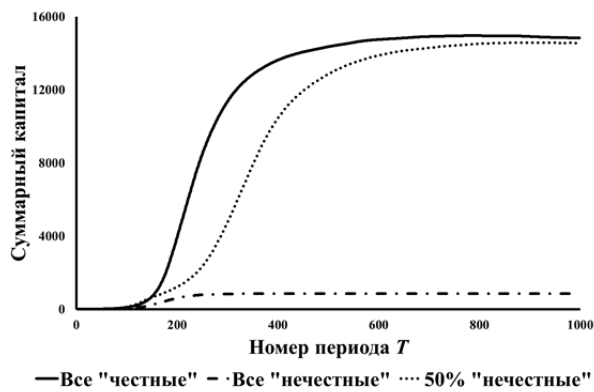


Рис. 7. Зависимость суммарного капитала инвесторов от времени
С инфляцией и амортизацией ($k_{amr} = k_{inf} = 0.95$)

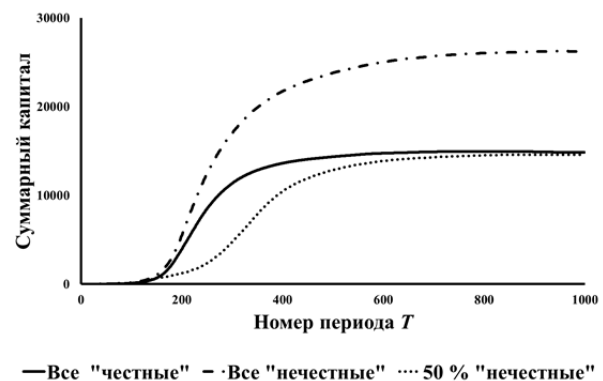


Рис. 8. Зависимость суммарного капитала производителей от времени
С инфляцией и амортизацией ($k_{amr} = k_{inf} = 0.95$)

работы. Видно, что в режиме, когда все инвесторы «честные», суммарный капитал инвесторов выше. В случае, когда все инвесторы «нечестные», суммарный капитал инвесторов значительно ниже. Если половина инвесторов честная, а другая «нечестная», суммарный капитал растет, но медленнее, чем для всех честных инвесторов.

На Рис. 8 представлена динамика суммарных капиталов для производителей. В этом случае, видно, что суммарный капитал производителей выше, если все инвесторы «нечестные». Здесь следует учесть, что если инвесторы не делают капиталовложения в производителей, то производители не выплачивают часть своей прибыли инвесторам. Таким образом, когда инвесторы делают капиталовложения в меньшее количество производителей, производители накапливают самостоятельно капитал лучше. Но при некоторых входных параметрах

ситуация может измениться. В частности, если увеличить амортизацию, то производители не могут самостоятельно справиться (Рис. 9).

Рассмотрим теперь суммарный капитал всего сообщества (т. е. капитал инвесторов и производителей вместе). На Рис. 10 видно, что, когда все инвесторы «честные», сообществу в целом это выгоднее.

На Рис. 11 представлена динамика среднего коэффициента эффективности производителей. Коэффициент эффективности немного выше, когда половина инвесторов «нечестные». Таким образом, можно сделать вывод о том, что «нечестность» инвесторов до некоторой степени позволяет выживать более эффективным производителям. То есть, когда часть инвесторов ведет себя «нечестно» и делает капиталовложения только в одного производителя с лучшей оценкой, а другая часть инвесторов ориентируется на оценки, полученные итера-

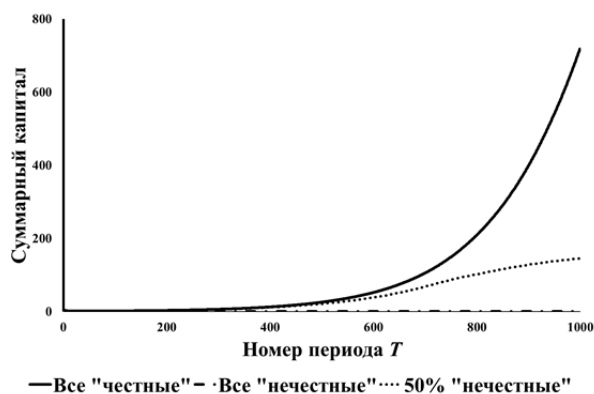


Рис. 9. Зависимость суммарного капитала производителей от времени
Увеличена амортизация ($k_{amr} = 0.80, k_{inf} = 0.95$)

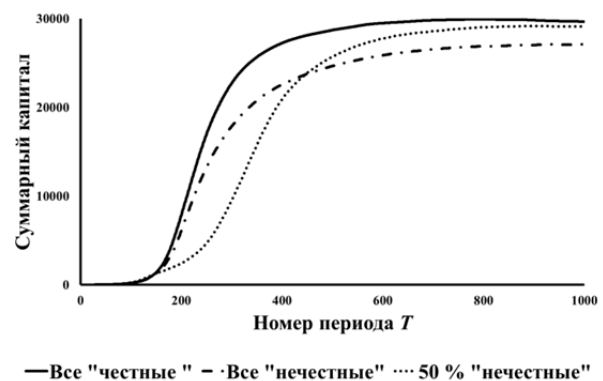


Рис. 10. Зависимость суммарного капитала всего сообщества от времени
С инфляцией и амортизацией ($k_{inf} = k_{amr} = 0.95$)

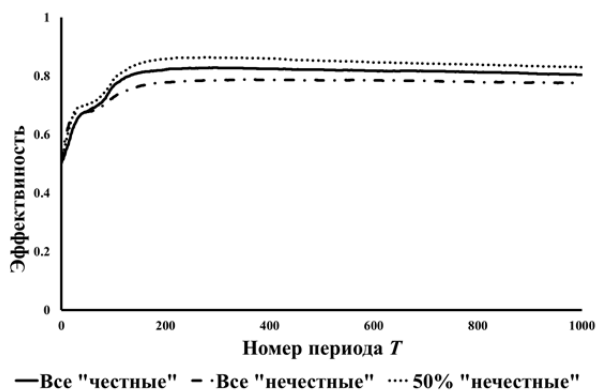
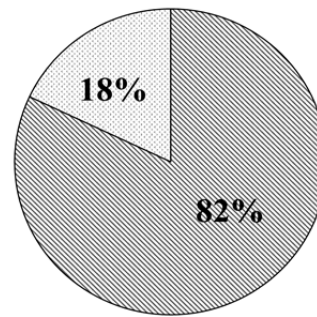


Рис. 11. Динамика коэффициента эффективности производителей
С инфляцией и амортизацией ($k_{inf} = k_{amr} = 0.95$)

тивным путем, то вероятность деления у производителей с более высокой эффективностью более высокая. При анализе результатов возникает также следующий вопрос: почему, когда инвестор «нечестен», вкладывая капитал в производителя с более высокой оценкой, в итоге получается, что средний коэффициент эффективности у сообщества производителей ниже. Ответ заключается в том, что оценка зависит от собственного капитала производителя и его эффективности (выражения (5) для оценки производителей инвесторами A_{ij} , а также формулы (1) и (2)). Когда инвестор «нечестен», он выбирает того производителя, который имеет в качестве оценки максимальное произведение эффективности k_i на капитал C_i . При этом эффективность k_i такого производителя может быть не самая высокая в сообществе, а высокая оценка получается за счет высокого капитала C_i . Когда же инвесторы делают *итеративные оценки*, они добавляют свои капиталовложения к капиталу производителя, который, возможно, имеет меньший капитал, но более высокую эффективность, тем самым усиливая его оценку. И такой производитель получает шанс делиться. Таким образом, для более высокой эффективности выгодно иметь в сообществе и «честных», и «нечестных» инвесторов.

Рис. 12 показывает соотношение «честных» и «нечестных» инвесторов в сообществе при $T=100$. Усреднения в данном случае не проводились. Параметры моделирования следующие: $N_T = 100$; $t_{max} = 10$; $Th_{min_pro} = 0.01$; $Th_{min_inv} = 0.01$; $Th_{max_pro} = 1.0$; $Th_{max_inv} = 1.0$; $M_0 = N_0 = 10$; $M_{max} = 30$; $N_{max} = 50$; $m = 30$; $k_{repar} = 0.7$; $a = 0.1$; $Th = 100$. В начальной популяции было 6 «чест-



■ «Честные» инвесторы □ «Нечестные» инвесторы

Рис. 12. Соотношение «честных» и «нечестных» инвесторов в сообществе в последнем периоде при $T = 100$
С инфляцией и амортизацией ($k_{amr} = k_{inf} = 0.95$)

ных» инвесторов и 4 «нечестных». В результате моделирования в итоговой популяции получилось 50 инвесторов, из них 41 «честные», а 9 «нечестные». То есть, «честные» инвесторы чаще делились. По результатам компьютерного моделирования можно сделать вывод, что в данной модели честная стратегия более устойчива.

Таким образом, исследованы основные особенности модели с «нечестной» конкуренцией инвесторов. Проанализировано влияние доли нечестных инвесторов на динамику капиталов, как производителей, так и инвесторов. Для некоторых аспектов экономической системы нечестные инвесторы могут играть положительную роль. Например, при определенных параметрах модели капитал производителей может быть выше при нечестных инвесторах, хотя это наблюдается не всегда (Рис. 8, Рис. 9 и соответствующее обсуждение). Но общий капитал инвесторов и производителей выше при честной конкуренции инвесторов (Рис. 10). Также общество честных инвесторов более стабильно (Рис. 12).

Итак, результаты проведенного анализа демонстрируют большую надежность и эффективность честной конкуренции инвесторов.

Заключение

В работе детально исследованы процессы поиска решений автономными агентами, которые обмениваются информацией с целью выработки коллективного поведения в многоагентной системе. Кратко изложена базовая модель взаимодействия инвесторов и производителей в среде прозрачной экономической системы. Оригинальные черты этой модели: сотрудниче-

ство 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 капиталовложений. Важно, что наличие итераций приводит к более эффективному сотрудничеству в экономическом сообществе, чем аналогичное сотрудничество без итераций. Изложены новые результаты исследования базовой модели.

Предложены и исследованы две специальные модели, развивающие базовую: модель с «открытой» монополией и модель «нечестной» конкуренции. В модели с «открытой» монополией возможно появление «производителя-монополиста» с большой эффективностью, значительно превышающей эффективность остальных производителей. Показано, что при начально низкой эффективности производителей появление эффективной инновации хотя бы у одного производителя положительно влияет на динамику капиталов. У сообщества появляется шанс выжить. В противном случае все общество перестает функционировать, и экономическая система разрушается.

В модели с «нечестной» конкуренцией инвесторов считается, что инвесторы (по крайней мере, некоторые из них) не совсем честны: они вкладывают капитал только в одного преимущественного производителя, а не во всех тех, о которых они предварительно сообщили всему экономическому сообществу. Для этой модели рассмотрены несколько вариантов сообщения информации инвесторами всему сообществу: а) все инвесторы честные, т. е. они делают точно такие вклады, о которых ранее сообщили всему сообществу; б) все агенты нечестные, т.е. они делают вклад только в преимущественного производителя, а не в тех, о которых они ранее сообщили сообществу; в) половина инвесторов честная, а половина нечестная. Проанализированы преимущества и недостатки того или иного варианта для совокупности инвесторов и производителей, а также для всего экономического сообщества в целом. Продемонстрировано, что для всего сообщества выгодно, чтобы все инвесторы были честными. В этом случае более эффективно увеличивается общий капитал инвесторов и производителей и само сообщество более стабильно.

Отметим, что хотя исследованные в данной работе модели не имеют прямых приложений, вместе с тем, они могут быть использованы при анализе реальных экономических процессов. Например, модель с «открытой» монополией может быть использована при анализе важных социально-экономических процессов, возникающих при появлении радикальных инноваций. В частности, потребность в таком анализе может возникнуть при появлении роботов, заменяющих человека в производстве и сильно повышающих эффективность производителей. Авторы благодарны С. А. Доленко и Г. В. Ройзензону за обсуждение и полезные рекомендации, а также анонимным рецензентам за замечания, способствовавшие улучшению статьи.

Литература

1. Ye D., Zhang M., Vasilakos A.V. A survey of self-organization mechanisms in multiagent systems // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*. 2017. V. 47. No. 3. P. 441–461.
2. Макаров В.Л., Бахтизин А.Р. Социальное моделирование – новый компьютерный прорыв (агент-ориентированные модели). – М.: Экономика, 2013. 295 с.
3. Axelrod R. The evolution of cooperation. New York, Basic Books, 1984. 241 p.
4. Полтерович В.М. От социального либерализма – к философии сотрудничества // *Общественные науки и современность*. 2015. № 4. С. 41–64.
5. Полтерович В.М. Позитивное сотрудничество: факторы и механизмы эволюции // *Вопросы экономики*. 2016. № 11. С. 5–23.
6. Редько В.Г., Бурцев М.С., Сохова З.Б., Бесхлебнова Г.А. Моделирование конкуренции при эволюции многоагентной системы // *Искусственные общества*. 2007. Т. 2. № 2. С. 76–89.
7. Варшавский В.И., Поспелов Д.А. Оркестр играет без дирижера: Размышления об эволюции некоторых технических систем и управления ими. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984. 208 с.
8. Claes R., Holvoet T., Weyns D. A decentralized approach for anticipatory vehicle routing using delegate multiagent systems // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2011. V. 12. No. 2. P. 364–373.
9. Holvoet T., Valckenaers P. Exploiting the environment for coordinating agent intentions // In: *Environments for Multi-Agent Systems III, Lecture Notes in Artificial Intelligence*. Berlin et al.: Springer. 2007. V. 4389. P. 51–66.
10. Редько В.Г., Сохова З.Б. Агент-ориентированная модель прозрачной рыночной экономической системы // XVI Всероссийская научно-техническая конференция «Нейроинформатика-2014» с международным участием: Сборник научных трудов. В 3-х частях. Ч. 2. М.: НИЯУ МИФИ, 2014. С. 174–184.
11. Sokhova Z.B., Red'ko V.G. Agent-based model of interactions in the community of investors and producers // In:

Samsonovich A.V., Klimov V.V., Rybina G.V. Eds. *Biologically Inspired Cognitive Architectures (BICA) for Young Scientists. Proceedings of the First International Early Research Career Enhancement School (FIERCES 2016)*. Springer International Publishing Switzerland, 2016. P. 235–240.

12. Редько В.Г., Сохова З.Б. Модель взаимодействия инвесторов и производителей в прозрачной экономической системе // *Экономика и математические методы*. 2018. Т. 54. № 2. С. 50–61.

Modeling of searching for investing solutions by autonomous agents in a competitive transparent economy

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

Federal State Institution "Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences", Moscow, Russia

Abstract. The paper develops methods of searching for useful solutions by autonomous agents in competitive economical systems. The study is based on a previously proposed original model of a transparent economic system. We consider the interaction between investors and producers of an economical society. The information exchange between these economical agents ensures the transparency of economical systems. The basic model of interaction is developed, and two new special models are proposed and investigated. The results obtained during the computer simulation show the effectiveness of the proposed interaction scheme of autonomous agents.

Keywords: autonomous agents, decentralized system, information exchange, transparent economy, cooperation, competition.

DOI 10.14357/20718594190210

References

1. Ye D., Zhang M., Vasilakos A.V. 2017. A survey of self-organization mechanisms in multiagent systems // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*. 47(3):441–461.
2. Makarov V.L., Bahtizin A.R. 2013. *Sotsialnoye modelirovaniye — novyy kompyuternyy proryv. Agentorientirovannyye modeli* [Social simulation is a new computer breakthrough. Agent-based models]. Moscow: Ekonomika Publ. 295 p.
3. Axelrod R. 1984. *The evolution of cooperation*. N.Y.: Basic Books. 241 p.
4. Polterovich V.M. 2015. Ot social'nogo liberalizma – k filosofii sotrudnichestva [From Social Liberalism to Philosophy of Cooperation]. *Obshchestvennye nauki i sovremennost'* [Social Sciences and Contemporary World]. 4:41–64.
5. Polterovich V.M. 2016. Pozitivnoye sotrudnichestvo: faktory i mekhanizmy ehvolyucii [Positive Collaboration: Factors and Mechanisms of Evolution]. *Voprosy ehkonomiki* [J. Economics]. 11:5–23. doi.org/10.32609/0042-8736-2016-11-5-23
6. Red'ko V.G., Burtsev M.S., Sokhova Z.B., Beskhlebnova G.A. 2007. Modelirovaniye konkurencii pri ehvolyucii mnogoagentnoy sistemy [Modeling competition with evolution of a multi-agent system]. *Iskusstvennyye obshchestva* [Artificial Societies]. 2(2):76–89.
7. Varshavskiy V.I., Pospelov D.A. 1984. Orkestr igraet bez dirizhera: Razmyshleniya ob ehvolyucii nekotorykh tekhnicheskikh sistem i upravleniya imi [The orchestra plays without a conductor: reflections on the evolution of some technical systems and their management]. Moscow: Nauka Pubs. 208 p. (Translated to English as Varshavsky, V.I., D.A. Pospelov. 1988. *Puppets without strings: Reflections on the evolution and control of some man-made systems*. Publisher: Mir. 294 p.)
8. Claes R., Holvoet T., Weyns D. 2011. A decentralized approach for anticipatory vehicle routing using delegate multiagent systems. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 12(2):364–373.
9. Holvoet T., Valckenaers P. 2007. Exploiting the environment for coordinating agent intentions. In: *Environments for Multi-Agent Systems III, Lecture Notes in Artificial Intelligence*, Berlin et al.: Springer. 4389:51–66.
10. Red'ko V.G., Sokhova Z.B. 2014. Agent-orientirovannaya model prozrachnoy rynochnoy ehkonomicheskoy sistemy [Agent-oriented model of transparent market economic system]. XVI Vserossiyskaya nauchno-tehnicheskaya konferenciya «Nejroinformatika-2014» s mezhdunarodnym uchastiem: Sbornik nauchnykh trudov [Proceedings of XVI International Scientific and Technical Conference "Neuroinformatics-2014"]. Moscow: NIYAU MIFI. 174–184.
11. Sokhova Z.B., Red'ko V.G. 2016. Agent-based model of interactions in the community of investors and producers. In: Samsonovich A.V., Klimov V.V., Rybina G.V. Eds. *Biologically Inspired Cognitive Architectures (BICA) for Young Scientists. Proceedings of the First International Early Research Career Enhancement School (FIERCES 2016)*. Springer International Publishing Switzerland. 235–240.
12. Red'ko V.G., Sokhova Z.B. 2018. Model vzaimodeystviya investorov i proizvoditelej v prozrachnoy ehkonomicheskoy sisteme [A model of interaction between investors and producers in a transparent economic system]. *Ehkonomika i matematicheskie metody* [Economics and the Mathematical Methods]. 54(2):50–61.