

*На правах рукописи*

**Сохова Зарема Борисовна**

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ПОИСКА РЕШЕНИЙ В  
АГЕНТ-ОРИЕНТИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ**

05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и  
комплексы программ»

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном учреждении «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук» (ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН), Центр оптико-нейронных технологий, отдел «Нейроинформатики».

Научный руководитель: **Редько Владимир Георгиевич**  
доктор физико-математических наук, гл.н.с. Центра оптико-нейронных технологий ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН

Официальные оппоненты: **Жилякова Людмила Юрьевна**  
доктор физико-математических наук, заведующая лабораторией, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук

**Тарасов Валерий Борисович**  
кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Центральный экономико-математический институт Российской академии наук

Защита состоится «\_\_\_\_\_» 2021 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д.002.073.04 на базе ФИЦ ИУ РАН по адресу: 117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 9 (конференц-зал, 1-ый этаж).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФИЦ ИУ РАН по адресу: Москва, ул. Вавилова, д. 40 и на официальном сайте ФИЦ ИУ РАН: <http://www.frccsc.ru>.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба высыпать по адресу: 119333, г. Москва, ул. Вавилова, д. 44, корп. 2, ФИЦ ИУ РАН, диссертационный совет Д 002.073.04.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» 2021 г.  
Телефон для справок: +7 (499) 135-51-64

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 002.073.04,  
доктор технических наук, профессор

В.Н. Крутько

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертации.** Одной из новых парадигм, позволяющих исследовать поведение сложных систем, является агентный подход. Он включают в себя агент-ориентированное моделирование АОМ (англ. agent-based modeling), которое широко используется при решении задач оптимизации и управления, моделировании коллективного поведения, в социальных и экономических исследованиях. АОМ – это моделирование снизу вверх, то есть микроскопическое моделирование. Построив компьютерную модель, в которой определены агенты и простые правила их поведения, можно наблюдать за тем, как функционирует система в целом (макроскопический уровень). При этом несмотря на то, что правила поведения агентов достаточно просты, вся система в целом может демонстрировать сложное поведение. Парадигма агент-ориентированных систем тесно связана с многоагентными системами МАС (англ. multi-agent systems, MAS). Методы АОМ и МАС сейчас широко используются для моделирования сложных социально-экономических систем, в том числе для изучения поведения экономических агентов. В данной диссертационной работе исследуются новые методы поиска решений автономными агентами в динамической децентрализованной среде, состоящей из совокупности автономных агентов, в которой каждый агент принимает решение самостоятельно, при этом, благодаря возможности сотрудничества (обмен информацией и прозрачность среды), возможно эффективное функционирование всей системы в целом. На основании изложенного тема диссертации является **актуальной**.

**Цель и задачи исследования.** Диссертационная работа представляет собой математическое и компьютерное исследование поведения автономных агентов. Цель исследования – изучение и разработка новых методов поиска решений автономными агентами в децентрализованных системах. Достижение поставленной цели предполагает решение следующих задач:

1. Построение и исследование базовой модели коллективного поведения агентов в децентрализованной динамической среде.
2. Разработка математической и компьютерной модели взаимодействия автономных агентов.

3. Исследование сходимости предложенного метода при различных управляющих параметрах.
4. Построение аналитического приближения для определения характера поведения модели.
5. Построение и исследование четырех специальных моделей на основе базовой:
  - разработка модели с «открытой» монополией;
  - разработка модели с «нечестной» конкуренцией;
  - разработка модели с гибким распределением прибыли;
  - разработка обобщенной модели самоорганизации агентов при решении задачи распределения ресурса между ячейками.
6. Построение модели эволюции и обучения автономных агентов, в которой каждый агент может обучаться, формируя степени доверия к другим агентам.
7. Разработка и исследование дополнительных агент-ориентированных моделей поискового поведения автономных агентов для решения различных прикладных задач.

**Научная новизна.** Впервые в классе агент-ориентированных систем предложена и исследована модель взаимодействия сообществ экономических агентов в «прозрачной» среде. Оригинальные черты модели: *сотрудничество, открытость информации, открытость намерений агентов, итеративный процесс принятия решений.*

Разработан и исследован новый метод итеративного принятия решений автономными агентами. Показано, что итеративный метод обеспечивает более эффективное сотрудничество в искусственном экономическом сообществе, чем аналогичное сотрудничество без итераций.

Построено аналитическое приближение для понимания общей динамики основных исследуемых характеристик модели.

Предложен алгоритм обучения автономных агентов, который позволяет исследовать процессы самоорганизации в модели.

**Практическая ценность.** Разработанный метод может быть основой для построения аналогичных агент-ориентированных моделей, предназначенных для исследования коллективного поведения агентов в сложных динамических системах.

Построенные модели могут быть использованы при исследовании конкуренции и сотрудничества в экономических и социальных науках, в которых эти категории играют важную роль.

С учетом того, что в последние годы уделяется большое внимание методам, направленным на усиление прозрачности экономики, предложенная модель может быть доказательством выгодности открытости информации для экономических агентов.

На основе предложенной модели может быть разработана программная платформа для прозрачного взаимодействия производителей и инвесторов в малом регионе.

**Методы исследования.** Работа выполнена в рамках методологии агент-ориентированного моделирования и теории сложных систем. Для решения поставленных задач в работе были использованы методы построения математических моделей и многоагентных самоорганизующихся систем. Для анализа разработанных моделей использованы методы компьютерного моделирования.

**На защиту выносятся:**

1. Базовая математическая модель коллективного поведения конкурирующих автономных агентов в прозрачной среде с элементами сотрудничества. Результаты исследования базовой математической модели взаимодействия автономных агентов.
2. Итеративный алгоритм принятия рациональных решений автономными агентами, которые учитывают собственную выгоду. Результаты численных экспериментов, показывающие эффективность предложенного алгоритма.
3. Результаты и анализ компьютерных экспериментов для четырёх специальных моделей, демонстрирующих возможности применения предложенной базовой модели для исследования более широкого класса задач.
4. Результаты и анализ компьютерных экспериментов для модели эволюции и обучения автономных агентов. Сопоставительный анализ режимов «с обучением» и «без обучения» для упрощённой эволюционной модели.
5. Разработанная агент-ориентированная модель рынка аренды и результаты ее исследования.
6. Разработанная модель поискового поведения автономных кооперирующихся агентов-охранников. Результаты, полученные в ходе компьютерных экспериментов.

**Достоверность** полученных результатов подтверждена данными численных экспериментов, полученных с помощью разработанных алгоритмов и комплекса программ.

**Апробация работы и научные публикации.** Основные положения работы докладывались на следующих конференциях:

1. Международная научная школа-семинар имени академика С.С. Шаталина «Системное моделирование социально-экономических процессов» (Нижний Новгород, 2018);
2. 2017 Annual International Conference on Biologically Inspired Cognitive Architectures: Eighth Annual Meeting of the BICA Society (Москва, 2017);
3. Biologically Inspired Cognitive Architectures (BICA) for Young Scientists. Proceedings of the First International Early Research Career Enhancement School (FIERCES 2016);
4. 1-я международная конференция «Модели мышления и интеграция информационно-управляющих систем» (г. Нальчик, 2017);
5. 15-я, 16-я Всероссийская научно-техническая конференция «Нейроинформатика» (Москва, 2013, 2014);
6. 18-я, 19-я, 20-я, 21-я, 22-я Международная научно-техническая конференция «Нейроинформатика» (Москва, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020);
7. 6-я, 7-я и 10-я Всероссийская конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Искусственный интеллект: философия, методология, инновации» (Москва, 2012, 2013, 2017);
8. 7-я и 8-я Международная научно-техническая конференция «Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте» (Коломна, 2013, 2015);
9. 1-я и 2-я Всероссийская конференция «Социофизика и социоинженерия» (Москва, 2015, 2018);
10. IV Международная конференция «Математическая биология и биоинформатика» (г. Пущино, 2012).

Основные результаты диссертации опубликованы в 32 работах, в том числе опубликовано 4 статьи в рецензируемых журналах из списка изданий, рекомендованных ВАК, 2 статьи в зарубежных научных периодических изданиях, входящих в Scopus, 18 статей в трудах научных конференций (в том числе 10 – в трудах международных конференций, 4 из них в трудах профильных конференций в изданиях, входящих в список Web of Science и Scopus).

**Личный вклад.** Автором лично проведены исследования и анализ предложенных агентных моделей, разработаны компьютерные программы для проведения экспериментов.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация изложена на 160 страницах, состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованных источников, насчитывающего 118 наименований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Основное содержание работы сосредоточено в главах 2 и 3. Глава 2 посвящена разработке и исследованию оригинальной базовой модели прозрачной экономики. Разработанная модель используется при построении ряда моделей, представленных в диссертации. В главе 3 базовая модель рассматривается в эволюционном контексте.

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, охарактеризована научная новизна полученных результатов и их практическая значимость, указаны методы исследования и положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** представлен обзор работ, посвященных агент-ориентированным системам. Описан ход становления данной научной области. Приведена характеристика современных исследований по теории многоагентных систем, агент-ориентированной вычислительной экономике, искусственным обществам. Проанализированы методы построения агент-ориентированных моделей и механизмы взаимодействия агентов. Описан круг задач, которые решаются в данной парадигме.

**Во второй главе** представлена оригинальная базовая модель поиска решений автономными агентами в динамической децентрализованной среде.

В базовой модели рассматривается взаимодействие двух сообществ агентов: *агентов-инвесторов* и *агентов-производителей*. Приведем краткое описание модели. Число инвесторов равно  $N$ , число производителей равно  $M$ . Каждый из агентов имеет определенный капитал  $K_{inv}$  (инвесторы) или  $K_{pro}$  (производители). Количество агентов в сообществах ограничено, то есть  $N \leq N_{max}$ ,  $M \leq M_{max}$ , где  $N_{max}$ ,  $M_{max}$  – максимально возможное число инвесторов и производителей соответственно.

Агенты функционируют в течение  $N_T$  периодов. 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  $t = 1, 2, \dots, k_{iter}$ , где  $k_{iter}$  – максимальное количество итераций внутри периода. Таким образом, имеем *две временные шкалы*: 1) периоды (число периодов равно  $N_T$ ), 2) итерации (число итераций равно  $k_{iter}$ ). В течение каждого периода агенты обмениваются информацией.

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 работе исследовалось поведение системы для различных функций прибыли. Основное моделирование проведено для линейно-пороговой функции и нелинейной функции. Линейно-пороговая функция 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 ( $a > 0$ ),  $Th$  – порог функции  $F(x)$ . Нелинейная функция имеет вид:

$$F(x) = \frac{x^2}{x^2 + a^2}, \quad (3)$$

где  $a$  – положительный параметр ( $a \geq 1$ ).

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:

$$P_{inv\ ij} = k_{repay} P_i(C_i) \frac{C_{ij}}{\sum_{l=1}^N C_{il}}, \quad (4)$$

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

$$P_{pro\ i} = P_i(C_i) - \sum_{j=1}^N P_{inv\ ij}. \quad (5)$$

Итеративный процесс состоит в следующем. На первой итерации производители сообщают инвесторам, какой капитал у них имеется 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:

$$A_{ij} = d_{ij} P_{inv\ ij} = d_{ij} k_{repay} k_i F(C'_{i0}) \frac{C_{ij}}{\sum_{l=1}^N C_{il}}, \quad (6)$$

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),  $k_{repay}$  – 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, то есть 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:

$$C_{ij} = K_{inv\ j} \frac{A_{ij}}{\sum_{l=1}^M A_{lj}}. \quad (7)$$

На второй итерации каждый инвестор 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, то есть у производителя формируется оценка суммы  $\sum_{l=1}^N C_{il}$  и новая оценка своего капитала в соответствии с выражением (1).

Затем производители сообщают инвесторам свои новые капиталы  $C'_{i0}$  (уже с учетом намерений других инвесторов, то есть с учетом суммы  $\sum_{l=1}^N C_{il}$ ). Инвесторы делают оценки ожидаемой прибыли согласно выражению (6), в котором уже учитывается сумма намеченных капиталовложений всех инвесторов  $\sum_{l=1}^N C_{il}$ . Далее каждый инвестор формирует новое намерение распределить свой капитал пропорционально *новым полученным оценкам*  $A_{ij}$  согласно выражению (7). Инвесторы сообщают 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  $T$ . Окончательные капиталовложения равны величинам  $C_{ij}$ , полученным инвесторами на последней итерации.

В конце каждого периода  $T$  капиталы производителей и инвесторов пересчитываются с учетом амортизации и инфляции:

$$K_{inv}(T+1) = k_{inf} K_{inv}(T), \quad K_{pro}(T+1) = k_{amr} K_{pro}(T), \quad 0 < k_{amr}, \quad k_{inf} \leq 1.$$

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 этом агент-родитель отдает агенту потомку половину своего капитала. Если

капитал инвестора или производителя становится меньше определенного малого порога  $T_{min\_inv}$  или  $T_{min\_pro}$ , то такой инвестор или производитель погибает. При этом возможно уменьшение численности инвесторов и/или производителей и даже разрушение всей экономической системы. При переходе к новому периоду эффективности  $k_i$  варьируются.

Ниже представлены наиболее важные результаты компьютерных экспериментов, проведенных для базовой модели.

Типичные параметры моделирования были следующие: общее число периодов  $N_T = 100$ ; число итераций в каждом периоде  $k_{iter} = 30$ ; максимальные пороги капиталов производителей и инвесторов  $Th_{max\_pro} = 1$ ,  $Th_{max\_inv} = 1$ ; минимальные пороги капиталов производителей и инвесторов  $Th_{min\_pro} = 0.01$ ;  $Th_{min\_inv} = 0.01$ ; максимально возможное количество инвесторов в каждом периоде  $N_{max} = 100$ ; максимально возможное количество производителей в каждом периоде  $M_{max} = 100$ ; начальное количество инвесторов  $N_0 = 50$ ; начальное количество производителей  $M_0 = 50$ ; максимальное количество производителей, в которых делается капиталовложение  $m = 100$ , доля выплат из полученной производителями прибыли инвесторам  $k_{repay} = 0.3$ ; характерная величина случайной вариации эффективности производителей  $k_i$  равна  $\Delta k = 0.01$ ; параметр нелинейной функции  $F(x)$ , определяющей величину прибыли  $a = 5$ .

Важный вопрос, который возникает при моделировании – **сходимость итеративного процесса**. Была проверена зависимость конечного суммарного капитала производителей и инвесторов от числа итераций в каждом периоде для различных функций прибыли. Результаты в идеальной среде для нелинейной функции прибыли (3) (без инфляции и амортизации), представлены на рис. 1. Результаты усреднены по 100 различным расчетам.

Результаты эксперимента показывают, что итеративный процесс сходится (рис. 1). Сходимость итеративного процесса была продемонстрирована и для других параметров расчетов.

Проведены были эксперименты, демонстрирующие эффективность итераций. На рис. 2 представлены результаты моделирования для нелинейной функции прибыли. Результаты усреднены по 100 различным расчетам. Видно, что от итеративных оценок зависит как успешность инвесторов, так и успешность производителей. Причем в случае с инфляцией и амортизацией это влияние существенное (рис. 2б), так как, если итерации не проводятся, то капитал произво-

дителей и инвесторов уменьшается и сообщество прекращает свое существование.

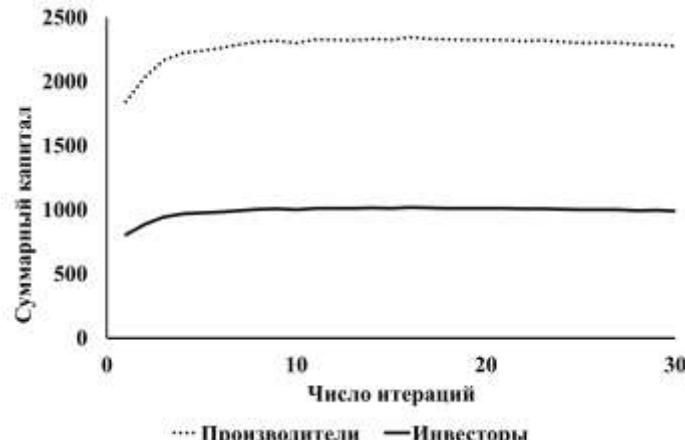
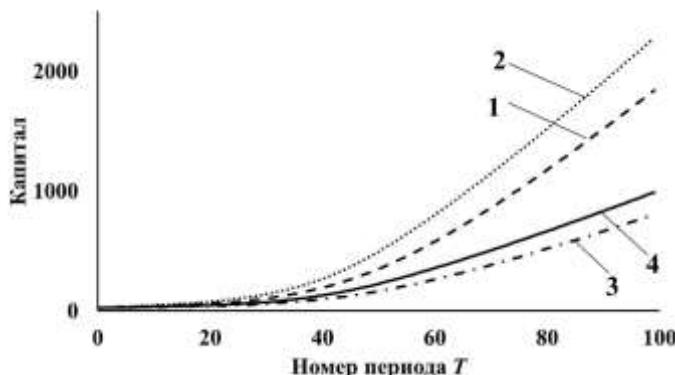


Рис. 1. Зависимость суммарных капиталов производителей и инвесторов от числа итераций ( $a = 5$ ;  $k_{amr} = 1$ ;  $k_{inf} = 1$ ;  $m = 100$ ;  $N_T = 100$ ;  $Th_{max\_inv} = Th_{max\_pro} = 1$ ;  $Th_{min\_inv} = Th_{min\_pro} = 0.01$ ;  $k_{repay} = 0.3$ )

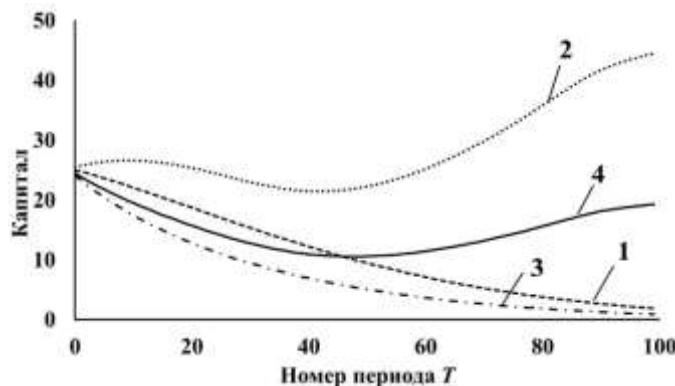
*Влияние других факторов.* Кроме приведенных результатов путем численных расчетов был проведен анализ влияния числа инвесторов, которые делают капиталовложения, на результативность итераций, исследована роль распределения прибыли между инвесторами и производителями (варьировался коэффициент  $k_{repay}$ ), исследовалось влияние амортизации и инфляции на поведение модели.

Численные расчеты показали, что *итеративный процесс сходится* для всех исследованных функций прибыли. Показано, что при использовании итераций инвесторы более *эффективно распределяют* собственный капитал между производителями.

В данной главе построены и исследованы четыре специальные модели, развивающие базовую: 1) модель с «открытой» монополией 2) модель с «нечестной» конкуренцией, 3) модель с гибким распределением прибыли, 4) обобщенная модель самоорганизации агентов при решении задачи распределения ресурса между ячейками. В обобщенной модели ресурс аналогичен капиталу инвесторов и производителей, а ячейки подобны производителям. В ячейках вырабатывается новый ресурс, это происходит аналогично выработке прибыли производителями.



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



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

Рис. 2. Роль итеративных оценок. Зависимость суммарного капитала производителей и инвесторов от времени; 1 – производители без итераций, 2 – производители с итерациями, 3 – инвесторы без итераций, 4 – инвесторы с итерациями ( $a = 5$ ;  $N_T = 100$ ;  $m = 100$ ;  $Th_{max\_inv} = Th_{max\_pro} = 1$ ;  $Th_{min\_inv} = Th_{min\_pro} = 0.01$ ;  $k_{repay} = 0.3$ )

В модели с «открытой» монополией, 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. Базовая модель для этого случая была модифицирована. При моделировании полагалось, что эффективности всех производителей в начале функционирования сообщества составля-

ли  $k_i = 0.1$ , для всех  $i = 1, \dots, M$ , а в период  $T = 20$  в сообществе появляется производитель с эффективностью  $k_i = 1.0$ , номер  $i$  этого производителя случаен. Можно предположить, что данный производитель ввел в производство какие-либо инновации, что усилило его конкурентоспособность. Показано, 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. Динамика капиталов производителей и инвесторов для модели с открытой «монополией» представлена на рис. 3.

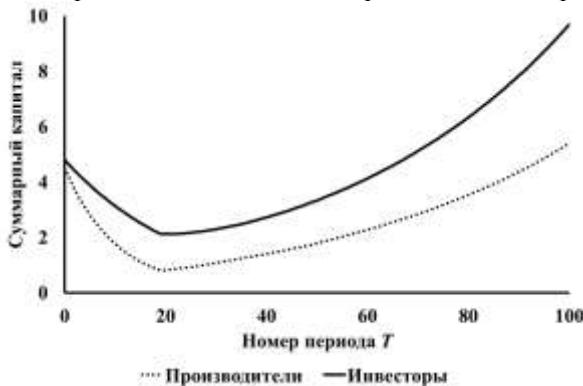
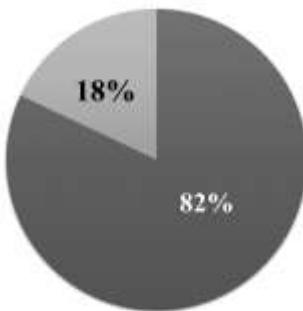


Рис. 3. Зависимость суммарного капитала инвесторов и производителей от времени. С инфляцией и амортизацией ( $k_{amr} = 0.90$ ,  $k_{inf} = 0.95$ ,  $N_T = 300$ ;  $k_{iter} = 10$ ;  $Th_{min\_pro} = Th_{min\_inv} = 0.01$ ;  $Th_{max\_pro} = 10.0$ ;  $Th_{max\_inv} = 10.0$ ;  $M_0 = N_0 = 10$ ;  $M_{max} = N_{max} = 20$ ;  $m = 20$ ;  $k_{repay} = 0.5$ ;  $a = 0.1$ ;  $Th = 100$ . Даные усреднены по 1000 различным расчетам)

В модели с «нечестной» конкуренцией «нечестные» инвесторы делают капиталовложения только в одного *преимущественного производителя*, а не во всех тех, о которых они предварительно сообщили всему экономическому сообществу. На рис. 4 показано соотношение «честных» и «нечестных» инвесторов в сообществе при  $T = 100$ . Усреднения в данном случае не проводились. Параметры моделирования для рис. 4 были следующие:  $N_T = 100$ ;  $k_{iter} = 10$ ;  $Th_{min\_pro} = 0.01$ ;  $Th_{min\_inv} = 0.01$ ,  $Th_{max\_pro} = 1.0$ ,  $Th_{max\_inv} = 1.0$ ,  $M_0 = N_0 = 10$ ;  $M_{max} = 30$ ;  $N_{max} = 50$ ;  $m = 30$ ;  $k_{repay} = 0.7$ ;  $a = 0.1$ ;  $Th = 1$ . В начальной популяции было 6 «честных» 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. Результаты исследования модели с «нечестной» конкуренцией демонстрируют, что «честная» конкуренция более стабильна и более эффективна.



■ "Честные" инвесторы ■ "Нечестные" инвесторы

Рис. 4. Соотношение «честных» и «нечестных» инвесторов в сообществе при  $T = 100$ . С инфляцией и амортизацией ( $k_{amr} = k_{inf} = 0.95$ )

Для модели с гибким распределением прибыли считалось, что производители при распределении прибыли учитывают свой собственный вклад в собственный капитал. Показано, что производителям выгоднее выбирать механизм распределения прибыли, предложенный в базовой модели. То есть, в базовой модели более «справедливое» сотрудничество у сообществ.

В обобщенной модели на основе агентного подхода рассматривается задача эффективного распределения ресурса агентов по ячейкам и анализируются различные варианты этих распределений.

В данной главе также получено аналитическое приближение для одного обобщенного инвестора и одного обобщенного производителя. В этом случае капиталы производителя и инвестора равны  $x$  и  $y$ , соответственно. Считаем, что инвестор вкладывает в производителя весь свой капитал. Тогда согласно базовой модели динамику капиталов можно приблизенно охарактеризовать уравнениями:

$$\frac{dx}{dt} = k_1 F(x+y) - k_2 x, \quad (8)$$

$$\frac{dy}{dt} = k_3 F(x+y) - k_4 y, \quad (9)$$

где  $F(x+y)$  – функция, характеризующая прибыль производителей,  $k_1$  – коэффициент, характеризующий прибыль производителя,  $k_3$  –

коэффициент, характеризующий прибыль инвестора,  $k_2$ ,  $k_4$  – коэффициенты, характеризующие амортизацию и инфляцию.

Считаем, что  $k_4 = k_2$ . Складывая (8) и (9), имеем:

$$\frac{dz}{dt} = (k_1 + k_3)F(z) - k_2 z, \quad (10)$$

где  $z = x + y$ . Проведем анализ для линейно-пороговой функции (2). Если функция  $F(z) = z$ , то

$$z = C e^{[(k_1 + k_3) - k_2]t}. \quad (11)$$

Если функция  $F(z) = A = \text{const}$ , то

$$\frac{dz}{dt} = (k_1 + k_3)A - k_2 z. \quad (12)$$

Обозначая  $u = k_2 z - (k_1 + k_3)A$ , имеем  $\frac{dz}{dt} = \frac{1}{k_2} \frac{du}{dt} = -u$ ,

$$\frac{du}{dt} = -k_2 u. \quad (13)$$

То есть  $u$  стремится к 0, а  $z$  стремится к постоянной величине, равной  $(k_1 + k_3) \frac{A}{k_2}$ .

Итак, общий капитал сообщества для линейно-пороговой функции  $F(z)$  экспоненциально растет или экспоненциально убывает при больших  $k_2$ , либо стремится к постоянной величине, когда  $F(z)$  достигает порога.

**В третьей главе** исследуется оригинальная *эволюционная модель взаимодействия автономных агентов в динамической среде*. Предлагается два подхода к построению эволюционной модели.

*В первом случае* задача инвесторов состоит в том, чтобы найти разумное распределение капиталовложений в производителей, не зная заранее свойств производителей. Рассматривается процесс эволюции сообществ и обучение инвесторов. Полагается, что производители могут быть эффективными или неэффективными. Инвесторы находят эффективных производителей, используя обучение и эволюцию. Показано, что при наличии обучения прибыль инвесторов и производителей растет быстрее, чем без обучения.

*Во втором случае*, как и в базовой модели, инвесторам открыта информация о свойствах производителей, но на решение инвесторов влияет степень доверия к производителю, которая формируется

у каждого инвестора в течение всего периода жизни и зависит от размера прибыли, которую он получает от того или иного производителя. Распределение капиталовложений происходит согласно формулам (1) – (7). Процесс эволюции включает в себя *отбор* агентов в новое поколение и *мутации*.

С помощью генотипов агенты передают информацию в следующие поколения. Генотипы сообщества инвесторов  $G_{inv}$  формируются из *степени доверия*  $g_{ij}$ . Генотипы производителей  $G_{pro}$  формируются из эффективностей производителей  $k_i$ . В начале рассматриваемого процесса эволюции генотипы  $g_{ij}$  и  $k_i$  задаются случайным образом и равномерно распределены в интервале  $[0, 1]$ . Генотип задается в момент рождения агента и не меняется в течение его жизни.

У инвесторов имеется также *текущая* степень доверия (фенотип), которая в момент рождения агента-инвестора совпадает с генотипом  $d_{ij} = g_{ij}$ , где  $d_{ij}$  – текущая степень доверия  $j$ -го инвестора к  $i$ -му производителю. Генотипы  $g_{ij}$  изменяются только посредством эволюции, а текущие степени доверия  $d_{ij}$  могут меняться от периода к периоду в *процессе обучения*. Рассматривается *дарвиновская эволюция*, так как по наследству передаются потомкам генотипы (с малыми мутациями), а не фенотипы.

Отбор производителей и инвесторов в новое поколение выполняется в соответствии с их функциями приспособленностей  $f(K_{pro})$  и  $f(K_{inv})$ . В данном случае полагалось, что функция приспособленности имеет вид  $f(K) = \exp(\beta K)$ , где  $K$  – конечный (в конце поколения) капитал инвестора или производителя,  $\beta$  – параметр интенсивности отбора. Для отбора используется *рулеточный метод* (вероятностный отбор с вероятностями, пропорциональными приспособленностям). Число производителей и инвесторов при отборе остается постоянным. Конечный капитал родителя делится между потомками поровну.

Обучение происходит без учителя, путем изменения *степени доверия* к производителям. В конце каждого периода  $T$  после получения прибыли от производителя инвестор пересчитывает текущие степени доверия по следующему правилу:

$$d_{ij}(T+1) = d_{ij}(T) + \alpha Q(P_{ij}) [1 - d_{ij}(T)] - \gamma d_{ij}(T), \quad (14)$$

где  $\alpha$  ( $\alpha > 0$ ) – параметр скорости обучения,  $Q(x) = x/C_{ij}$ ,  $P_{ij}$  – прибыль, полученная  $j$ -м инвестором от  $i$ -го производителя,  $C_{ij}$  – размер

капиталовложения инвестора. Последнее слагаемое характеризует уменьшение степени доверия, «забывание» навыка.

На рис. 5 представлены результаты компьютерных расчетов, которые демонстрируют влияние различных режимов работы программы на средний капитал инвесторов в одном поколении. Видно, что средний капитал инвесторов от поколения к поколению растет, и в режиме *с обучением и итеративными оценками* средний капитал инвесторов больше, чем в модели *без обучения и итераций*.



Рис. 5. Зависимость среднего капитала инвесторов от номера поколения  $T_G$

**В четвертой главе** построены и исследованы две дополнительные агент-ориентированные модели: 1) модель рынка аренды земель, 2) модель кооперирующихся агентов-охранников с потребностями и мотивациями.

Для модели рынка аренды земель предложено математическое описание схемы взаимодействия агентов. Рассматривается сообщество  $N$  землепользователей и центра малого региона. Исследованы механизмы распределения земельных участков для различных ситуаций на рынке аренды земельных угодий. В частности, показано, что для исследуемой модели, в случае, когда конкуренция на землю велика, центру выгоднее использовать итеративный механизм распределения земельных участков. Показано, что предложенные правила поведения агентов землепользователей приводят к росту их капиталов и производительностей.

Также в данной главе построена и исследована модель автономных агентов-охранников. Проведены компьютерные эксперименты с тремя вариантами модели: 1) одного агента с мотивациями, 2) одного агента без мотиваций и 3) группы агентов с мотивациями. Считается, что агент-охранник имеет две потребности: *питания* и *охраны территории*. Каждой потребности соответствует определенная *мотивация*. Исследуется роль *мотиваций и кооперации* в поведении автономного агента-охранника, проводится сравнительный анализ модели с мотивациями и без мотиваций, а также проверяется предположение о том, что кооперация повышает эффективность охранного поведения. Сравнительный анализ вариантов модели показал, что в модели с мотивациями агент-охранник показывает более разумное поведение, так как не выполняет лишний раз действие «питание», а питается только тогда, когда его ресурс становится ниже порога. Показано также, что кооперация агентов-охранников позволяет более эффективно выполнять задачу.

**В заключении** изложены основные результаты диссертации.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ**

В данной диссертационной работе получены следующие результаты.

1. Разработана и исследована оригинальная математическая модель «прозрачной» экономической системы с конструктивной конкуренцией. Агенты в модели действуют коллективно в децентрализованной среде, обмениваясь информацией. Оригинальные черты модели: *сотрудничество, открытость информации, открытость намерений агентов, итеративный процесс принятия решений*.
2. Разработан и детально исследован *итеративный метод принятия решений* автономными агентами. Продемонстрирована сходимость предложенного итеративного метода при различных управляющих параметрах. Показано, что итеративный метод обеспечивает более эффективное сотрудничество в искусственном экономическом сообществе, чем аналогичное сотрудничество без итераций.
3. Построены и исследованы четыре вида специальных моделей: 1) модель с «открытой» монополией, 2) модель с «нечестной» конкуренцией, 3) модель с гибким распределением прибыли, 4) обобщенная модель самоорганизации агентов при решении задачи распределения ресурса между ячейками. Для модели с

«открытой» монополией показано, что при «неэффективной» экономике, появление эффективной инновации хотя бы у одного производителя положительно влияет на динамику капиталов. При исследовании модели «нечестной» конкуренции показано, что «честная стратегия» выгоднее сообществу. Для модели с гибким распределением прибыли сделан вывод о том, что производителям выгоднее выбирать механизм распределения прибыли, предложенный в базовой модели. Согласно полученным результатам в базовой модели более «справедливое» сотрудничество у сообществ. Для обобщенной модели показано, что при обучении и итеративном обмене информацией агенты четко распределяются по небольшому числу агентов в каждой ячейке, при этом суммарный ресурс, накопленный сообществом больше, чем в модели без обучения и итераций.

4. Разработана модель эволюции и обучения инвесторов и производителей, в которой каждый инвестор может обучаться, формируя степени доверия к производителям. Исследовано взаимодействие между обучением и эволюцией.
5. Построена и исследована эволюционная модель взаимодействия агентов инвесторов и агентов производителей с *непрерывными степенями доверия* инвесторов к производителям. Показано, что в процессе эволюции выживают наиболее приспособленные агенты, то есть те производители, которые имеют более высокую эффективность, и те инвесторы, которые имеют более «корректные» степени доверия.
6. Разработаны и исследованы две дополнительные агент-ориентированные модели поискового поведения автономных агентов для решения прикладных задач: 1) модель рынка аренды и 2) модель кооперирующихся агентов-охранников.

#### Список работ, опубликованных автором по теме диссертации:

##### **Публикации в журналах, входящих в Перечень ВАК РФ**

1. Моделирование поиска инвестиционных решений автономными агентами в прозрачной конкурентной экономике / З.Б. Сохова, В.Г. Редько // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2019. – № 2. – С. 98–108.
2. Модель взаимодействия инвесторов и производителей в прозрачной экономической системе / В.Г. Редько, З.Б. Сохова // Экономика и математические методы. – 2018. – Т. 54, № 2. – С. 50–61.

3. Исследование коллективного поведения агентов в децентрализованной экономической системе / З.Б. Сохова, В.Г. Редько // Известия КБНЦ РАН. – 2017. – Т. 2, № 6(80). – С. 221–229.
4. Агент-ориентированная модель аренды сельскохозяйственных угодий в регионе / З.Б. Сохова, В.Г. Редько, З.В. Нагоев // Известия КБНЦ РАН. – 2015. – Т. 2, № 6(68). – С. 174–182.

**Публикации в журналах, входящих в список Scopus**

5. Model of collective behavior of investors and producers in decentralized economic system / V.G. Red'ko, Z.B. Sokhova // Procedia Computer Science. – 2018. – V. 123. – PP. 380–385.
6. Iterative method for distribution of capital in transparent economic system / V.G. Red'ko, Z.B. Sokhova // Optical Memory & Neural Networks (Information Optics). – 2017. – V. 26, № 3. – PP. 182–191.

**Публикации в трудах профильных конференций в изданиях, входящих в список Web of Science и Scopus**

7. Model of self-organizing system of autonomous agents / Z.B. Sokhova // In: Kryzhanovsky B., Dunin-Barkowski W., Redko V., Tiumentsev Y. (eds.) Advances in Neural Computation, Machine Learning, and Cognitive Research IV, Springer, Cham, Studies in Computational Intelligence (SCI). –2021. V.925. – PP. 93–100. – **Web of Science, Scopus**.
8. Comparison of two models of a transparent competitive economy / Z.B. Sokhova, V.G. Red'ko // In: Kryzhanovsky B., Dunin-Barkowski W., Redko V., Tiumentsev Y. (eds.) Advances in Neural Computation, Machine Learning, and Cognitive Research III, Springer, Cham, Studies in Computational Intelligence (SCI). – 2020. – V.856. – PP. 131–137. – **Web of Science, Scopus**.
9. Processes of self-organization in the community of investors and producers / V.G. Red'ko, Z.B. Sokhova // In: Kryzhanovsky B., Dunin-Barkowski W., Redko V. (eds.) Selected Papers from the XIX International Conference on Neuroinformatics, October 2-6, 2017, Moscow, Russia. Springer International Publishing Switzerland, Studies in Computational Intelligence (SCI). –2018. – V.736. – PP. 163–169. – **Web of Science, Scopus**.
10. Agent-based model of interactions in the community of investors and producers // Z.B. Sokhova, V.G. Red'ko // 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), Advances in Intelligent Systems and Computing book series (AISC). Springer International Publishing Switzerland. – 2016. – V.449. – PP. 235–240. – **Web of Science, Scopus.**

#### **Публикации в других журналах**

11. Анализ механизмов распределения прибыли в модели прозрачной экономики / З.Б. Сохова // Труды НИИСИ РАН. –2019. – Т. 9, № 3. – С.78–82.
12. Эволюция и обучение в модели взаимодействия инвесторов и производителей / З.Б. Сохова, В.Г. Редько // Труды НИИСИ РАН. – 2019. – Т. 9, № 1. – С. 61–65.
13. Анализ влияния эволюционных процессов и обучения на поведение экономических агентов / З.Б. Сохова, В.Г. Редько // Известия КБНЦ РАН. – 2018. – Т. 3, №6(86). – С. 123–131.
14. Многоагентная модель аренды сельскохозяйственных земель в регионе / В.Г. Редько, З.Б. Сохова // Искусственные общества. – 2015. – Т. 10, № 1–4. – С. 5–20.
15. Многоагентная модель прозрачной рыночной экономической системы / В.Г. Редько, З.Б. Сохова // Труды НИИСИ РАН. – 2013. – Т. 3, № 2. – С. 61–65.
16. Многоагентная модель честной рыночной экономики / В.Г. Редько, З.Б. Сохова, О.В. Редько // Искусственные общества. – 2013. – Т. 8, № 1–4. – С. 63–77.
17. Многоагентная модель прозрачной экономической системы / В.Г. Редько, З.Б. Сохова // Сложность. Разум. Постнеклассика. – 2013. – № 3. – С. 90–96.
18. Моделирование конкуренции при эволюции многоагентной системы / В.Г. Редько, М.С. Бурцев, З.Б. Сохова, Г.А. Бесхлебнова // Искусственные общества. –2007. – Т. 2, № 2. – С. 76–89.

#### **Публикации в трудах других профильных конференций**

19. Эволюция и обучение в модели децентрализованной экономической системы / З.Б. Сохова, В.Г. Редько // Модели мышления и интеграция информационно-управляющих систем (ММИИУС-2018). Материалы второй Международной научной конференции, посвящённой 25-летнему юбилею Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук. – 2018. – С. 83–88.
20. Исследование процессов самоорганизации в эволюционной модели прозрачной экономики / З.Б. Сохова // XX Международная научно-техническая конференция «Нейроинформатика-

- 2018». Сб. науч. трудов: в 3-х частях. – М.: НИЯУ МИФИ, 2018. – Ч. 1. – С. 211–220.
21. Эволюционная модель децентрализованной прозрачной экономики / В.Г. Редько, З.Б. Сохова // «Социофизика и социоинженерия 2018». Труды второй Всероссийской междисциплинарной конференции / Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН; Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова. – 2018. – С. 95–96.
  22. Агент-ориентированная модель рынка аренды сельскохозяйственных угодий в регионе / З.Б. Сохова, В.Г. Редько // XVIII Международная научно-техническая конференция «Нейроинформатика-2016». Сб. науч. трудов: в 3-х частях. – М.: НИЯУ МИФИ, 2016. – Ч. 1. – С. 204–213.
  23. Многоагентная модель распределения сельскохозяйственных угодий в регионе / В.Г. Редько, З.Б. Сохова // Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте. Сб. науч. трудов VIII-й международной научно-технической конференции: в 2-х томах, Коломна, 18-20 мая, 2015 г. – М.: Физматлит, 2015. – Т. 2. – С.486–493.
  24. Многоагентная модель коллективного взаимодействия инвесторов и производителей в прозрачной экономической системе / З.Б. Сохова // Социофизика и социоинженерия. Сб. науч. трудов Первой российской конференции, Москва, 8-11 июня, 2015 г. – 2015. – С. 59.
  25. Агент-ориентированная модель прозрачной рыночной экономической системы / В.Г. Редько, З.Б. Сохова // XVI Всероссийская научно-техническая конференция «Нейроинформатика-2014» с международным участием. Сб. науч. трудов: в 3-х частях. – М.: НИЯУ МИФИ, 2014. – Ч. 2. – С. 174–184.
  26. Модель взаимодействия агентов инвесторов и производителей в среде прозрачной рыночной экономики / З.Б. Сохова // Искусственный интеллект: философия, методология, инновации. Сб. трудов VII Всероссийской конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. – М.: МГТУ МИРЭА, 2013. – Ч. 1. – С. 16–23.
  27. Модель прозрачной рыночной экономики / В.Г. Редько, З.Б. Сохова // Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях. Труды III всероссийской конференции, Нижний Новгород. – ИПФ РАН, 2013. – С. 134–135.

28. Многоагентная модель честной рыночной экономики. Первые результаты / В.Г. Редько, З.Б. Сохова // Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте. Сб. науч. трудов VII-й международной научно-технической конференции: в 3-х томах, Коломна, 20-22 мая, 2013 г. – М.: Физматлит, 2013. – Т. 2. – С. 695–703.
29. Модель кооперирующихся агентов-охранников с потребностями и мотивациями / З.Б. Сохова, Р.Р. Шикзатов // Научная сессия НИЯУ МИФИ - 2013. XV Всероссийская научно-техническая конференция «Нейроинформатика-2013». Сб. науч. трудов: в 3-х частях. – М.: НИЯУ МИФИ, 2013. – Ч. 2. – С. 274–281.
30. Модель автономного агента-охранника / В.Г. Редько, З.Б. Сохова // Математическая биология и биоинформатика: IV Международная конференция, г. Пущино, 14-19 октября, 2012 г. Доклады / под ред. В.Д. Лахно. – М.: МАКС Пресс, 2012. – С. 162–163.
31. Исследование поведения агентов-инвесторов и агентов-производителей в многоагентной модели конкурентной экономики / З.Б. Сохова, В.Г. Редько // Искусственный интеллект: философия, методология, инновации. Сб. трудов VI Всероссийской конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. – М.: МГТУ МИРЭА, 2012. – Ч. 1. – С. 145–149.
32. Естественная модель искусственной жизни / В.Г. Редько, З.Б. Сохова, О.П. Мосалов, З.В. Нагоев // Труды XLVI научной конференции МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук». – Москва, Долгопрудный: МФТИ, 2003. – Т. 1. – Ч. 1. – С. 31–33.

#### **Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ**

33. «Программа, реализующая алгоритм взаимодействия агентов-инвесторов и агентов-производителей в многоагентной модели конкурентной экономики»: свидетельство о регистрации программы, реестр программ для ЭВМ, №2020613628 / Сохова З.Б., 19.03.2020.