

Сохова З.Б., Редько В.Г.
Москва, НИИСИ РАН
zarema.sokhova@gmail.com, vcredko@gmail.com

АГЕНТ-ОРИЕНТИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ СОТРУДНИЧЕСТВА АВТОНОМНЫХ ЭКОНОМИЧЕСКИХ АГЕНТОВ В КОНКУРЕНТНОЙ СРЕДЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект №19-01-00331.

Разработка новых методов для исследования сложных динамических систем сегодня является востребованной и актуальной задачей. Такие системы можно изучать в рамках методологии динамических систем, дискретно-событийного моделирования, системной динамики и агентного моделирования [1–4]. Агентный подход обеспечивает исследователя инструментами для естественного описания системы, чем отличается от других подходов, в которых описание взаимодействия большого количества субъектов с разными характеристиками затруднительно. Отметим, что теория агентов и многоагентных систем за последние десятилетия достигла стадии зрелости и сейчас широко применяется для изучения процессов взаимодействия, кооперации, самоорганизации, эволюции сложных динамических систем [5–8]. Эти процессы исследуются в рамках как распределенного искусственного интеллекта (Distributed Artificial Intelligence, DAI), так и децентрализованного искусственного интеллекта (Decentralized Artificial Intelligence, DzAI) [9]. Задав правила взаимодействия агентов (микроуровень) и построив компьютерную модель, можно наблюдать свойства, которые проявляются на уровне всего сообщества агентов (макроуровень).

Центральную роль в таких процессах играют различные механизмы взаимодействия элементов и подсистем, из которых состоит исследуемая система. В этом русле особенно актуальны исследования, которые моделируют такие явления как сотрудничество и конкуренция. В работах [10, 11] академиком Полтеровичем В.М. была предложена концептуальная схема для исследования сотрудничества в конкурентной среде. В данной статье предлагается конкретная агентная модель, соответствующая этой концепции. Исследование является развитием работ [12–15].

Полагаем, что сообщество, состоящее из N агентов-инвесторов и M агентов-производителей, взаимодействует в прозрачной среде. Отметим, что термин «прозрачная среда» не является строгим термином, который принят в научном сообществе, но в последние годы часто встречается в социально-экономических исследованиях. В нашей работе этот термин близок к термину «прозрачный рынок», который используется в экономике

[16]. Каждый из агентов имеет определенный начальный капитал. Количество агентов в сообществе ограничено. Существуют периоды функционирования сообщества. В начале каждого периода отдельный инвестор делает вклады в m производителей. В конце периода инвесторы принимают решение о том, какие вклады следует сделать в того или иного производителя в следующем периоде. Для того чтобы принять такое решение, с учетом намерений других инвесторов, организуется итеративный процесс, который подробно будет описан ниже.

Один период включает в себя несколько этапов. На первом этапе j -й инвестор делает вклад C_{ij} в i -го производителя. Общий капитал, который будет у производителя после получения вкладов от инвесторов, определяется выражением:

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

где C_{i0} – исходный капитал производителя, C_{ij} – капитал, вложенный j -м инвестором в i -го производителя в начале периода. Производитель вкладывает в производство весь капитал C_i , который у него имеется.

На втором этапе производители, используя имеющийся у них капитал, получают прибыль. Зависимость прибыли производителя от его текущего капитала $P_i(C_i)$ определяется по формуле: $P_i(C_i) = k_i F_i(C_i)$, где k_i – эффективность i -го производителя. Величины k_i исходно случайные, а в конце каждого периода случайно варьируются. В данной работе используется функция прибыли отличная от функций прибыли в работах [12–15]. Функция $F_i(x)$ в данном исследовании имела вид:

$$F_i(x) = \alpha_{1i} [1 - \exp(-\alpha_{2i}x)] \quad (2)$$

где α_{1i} ($\alpha_{1i} \in \mathbf{R}$), α_{2i} ($0 < \alpha_{2i} \leq 1$) – параметры функции прибыли.

На третьем этапе производитель возвращает инвесторам вложенный ими капитал и распределяет между инвесторами часть полученной им прибыли. Прибыль, которую получает отдельный инвестор, определяется по формуле:

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

где C_i – текущий капитал i -го производителя, k_{repa} – параметр, характеризующий долю выплат прибыли инвесторам. Размер прибыли производителя определяется по формуле:

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

На четвертом этапе инвесторы в течение *итеративного процесса* принимают решение о том, какие вклады сделать в следующем периоде.

Сначала инвесторы оценивают величины A_{ij} , характеризующие прибыль, ожидаемую от i -го производителя в течение нового периода. Эти величины определяются по формуле:

$$A_{ij} = d_{ij} Pr_{ij} = d_{ij} k_{repay} k_i F(C_{i0}), \quad (5)$$

где d_{ij} – текущая степень доверия j -го инвестора к i -му производителю. Затем каждый инвестор ранжирует всех производителей в соответствии с полученными оценками A_{ij} и выбирает m наиболее выгодных производителей. Далее каждый инвестор формирует намерение распределить свой капитал пропорционально полученным оценкам A_{ij} . Вклад j -го инвестора в i -го производителя C_{ij} на первой итерации, инвесторы рассчитывают по формуле:

$$C_{ij} = K_{invj} \frac{A_{ij}}{\sum_{i=1}^M A_{ij}}. \quad (6)$$

Затем инвесторы сообщают производителям о своих намеченных вкладах C_{ij} . На основе полученной информации производители пересчитывают свои предполагаемые капиталы C'_{i0} с учетом намеченных вкладов инвесторов. Происходит переход ко второй итерации и действия первой итерации повторяются, только на второй и дальнейших итерациях уже учитываются намеченные вклады других инвесторов, и оценка ожидаемой прибыли инвесторов A_{ij} рассчитывается по формуле:

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

Размеры вкладов инвесторов равны величинам C_{ij} , полученным инвесторами на последней итерации.

В конце каждого периода капиталы производителей пересчитываются с учетом амортизации по формуле:

$$K_{pro}(T+1) = k_{amr} K_{pro}(T). \quad (8)$$

Также учитываются расходы инвесторов, и капиталы инвесторов пересчитываются по формуле:

$$K_{inv}(T+1) = k_{inf} K_{inv}(T). \quad (9)$$

Если капитал становится ниже некоторого порога, то соответствующий производитель или инвестор погибает. Если капитал инвестора или производителя в конце периода становится больше определенного порога, и численность агентов в сообществе меньше максимально возможной, то такой инвестор или производитель рождает потомка. Половина капитала родителя передается потомку. Потомок производителя наследует эффективность родителя.

Приведем результаты компьютерного моделирования. Как отмечалось выше, в данном исследовании параметры α_1 и α_2 в функции прибыли (2) для производителей различаются. Величины α_1 и α_2 задаются случайно в начале моделирования и не меняются в течение всей жизни агентов. Начальные капиталы инвесторов и производителей исходно случайные, они были равномерно распределены в интервале $[0, 1]$.

Рассмотрим сначала работу итераций. На рис. 1 представлены результаты работы итеративного процесса для первого инвестора в периоде $T = 1$. Видно, что итерации для первого инвестора в первом периоде сходятся достаточно быстро. Аналогичные результаты были получены и для остальных инвесторов.

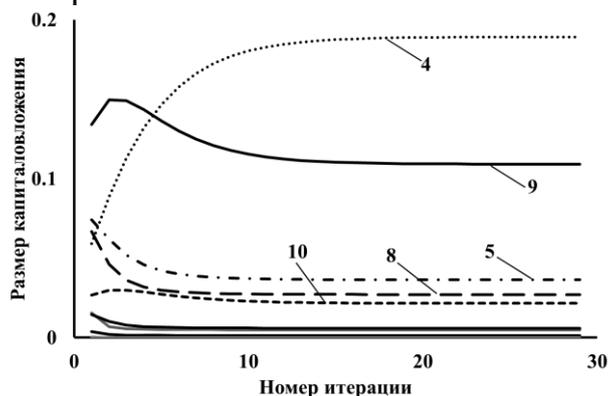


Рис. 1. Итеративный процесс для первого инвестора в периоде $T = 1$. Цифрами обозначены номера производителей, в которых сделаны наиболее значимые вклады ($N_{max} = M_{max} = N_0 = M_0 = 10$; $m = 10$; $k_{repay} = 0.5$, $k_{iter} = 30$; $k_{amr} = k_{inf} = 0.95$)

Для того чтобы показать, что инвесторы успешнее, если взаимодействуют с другими инвесторами (то есть, если они используют итеративные оценки для определения размера своих капиталовложений), были проведены расчеты с итеративными оценками ($k_{iter} = 30$) и без них ($k_{iter} = 1$). Результаты, представленные на рис. 2, усреднены по 50 различным расчетам. Видно, что в модели с инфляцией и амортизацией влияние итеративных оценок значительно, чем в модели без инфляции и амортизации.

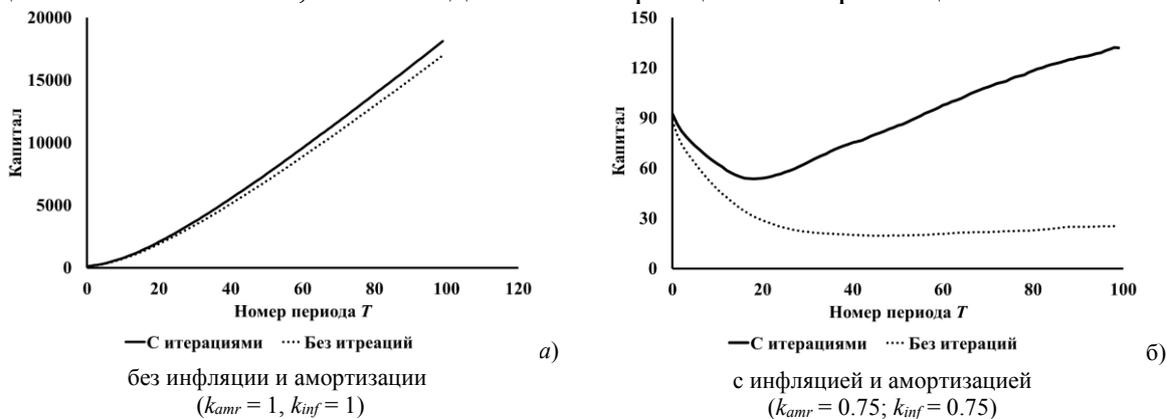


Рис. 2. Роль итеративных оценок.

Зависимость суммарного капитала сообщества в целом от времени ($N_{max} = M_{max} = N_0 = M_0 = 100$; $m = 100$; $k_{repay} = 0.5$)

Отметим, что предложенная в работе математическая модель прозрачной экономической системы имеет широкий потенциал для исследования различных социально-экономических процессов. В частности, в работе [15] исследованы три специальные модели, которые расширяют возможности описанной в данной работе модели: *модель нечестной конкуренции, модель открытой монополии, модель гибкого распределения прибыли.*

Основываясь на предположении о том, что среда прозрачна (то есть открыта информация о состояниях и намерениях агентов), предложен и исследован новый метод распределения капитала в конкурентной среде через сотрудничество. Разработана математическая модель взаимодействия агентов. Показано, что итеративный процесс, в ходе которого агенты-инвесторы принимают решения о своих вкладах, сходится. 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.

Список использованной литературы:

1. Bonabeau E. “Agent-based modeling: methods and techniques for simulating human systems”, *Proceedings National Academy of Sciences*, 2002, V. 99, P. 7280–7287
2. Карпов Ю.Г. “Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5”, СПб.: БХВ-Петербург, 2009
3. Данилов Ю.А. “Лекции по нелинейной динамике. Элементарное введение. Учебное пособие”, М.: Книжный дом «Либроком», 2017
4. Форрестер Дж. “Основы кибернетики предприятия (индустриальная динамика)”, М.: Прогресс, 1971
5. Тарасов В.Б. “От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика”, М.: Эдиториал УРСС, 2002
6. Макаров В.Л., Бахтизин А.Р. “Социальное моделирование – новый компьютерный прорыв (агент-ориентированные модели)”, М.: Экономика, 2013
7. 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, N. 3, P. 441–461
8. Городецкий В.И., Бухвалов О.Л., Скобелев П.О., Майоров И.В. “Современное состояние и перспективы индустриальных применений многоагентных систем”, *Управление большими системами*, 2017, Вып. 66, С. 94–157
9. Demazeau Y., Müller J.-P. “Decentralized A.I.”, Elsevier Science Publisher B.V., North-Holland, 1990
10. Полтерович В.М. “От социального либерализма – к философии сотрудничества”, *Общественные науки и современность*, 2016, № 4, С. 41–64.
11. Полтерович В.М. “Позитивное сотрудничество: факторы и механизмы эволюции”, *Вопросы экономики*, 2016, № 11, С. 5–23
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

13. 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, pp. 235–240

14. Red'ko V.G., Sokhova Z.B. "Iterative method for distribution of capital in transparent economic system", *Optical Memory & Neural Networks (Information Optics)*, 2017, Vol. 26, No. 3, P. 182–191

15. Сохова З.Б., Редько В.Г. "Моделирование поиска инвестиционных решений автономными агентами в прозрачной конкурентной экономике", *Искусственный интеллект и принятие решений*, 2019, № 2, С. 98–108

16. Bloomeld R., O'Hara M. "Market transparency: who wins and who loses?", *Review of Financial Studies* 12(1), 1999, P. 5–35