

# Моделирование конкуренции при эволюции многоагентной системы

Редько В.Г., Бурцев М.С., Сохова З.Б., Бесхлебнова Г.А.

## Введение

Агент-ориентированные модели (АОМ) имеют большие перспективы исследований в социально-экономических системах (Макаров, 2006). Одним из актуальных направлений работ в рамках многоагентного моделирования (Тарасов, 2002) является исследование конкуренции между различными агентами. Причем можно рассматривать два вида конкуренции: конструктивную и агрессивную. Особенно важно проанализировать ситуации, при которых исчезает агрессивная конкуренция, что позволяет понять условия возникновения согласованной, кооперативной работы агентов. Отметим, что полное исчезновение конкуренции невыгодно – конструктивная конкуренция может и должна приводить к соревнованию, поиску новых решений, к прогрессивному развитию. Однако агрессивная конкуренция, при которой агрессия приводит к жестокой борьбе между агентами, к войнам, к убийству одних агентов другими, очевидно, требует устранения и перехода к конструктивной конкуренции.

Исторически теории кооперативного поведения, учитывающего механизмы конкурентного взаимодействия между агентами, начинались с моделей классической популяционной генетики (Wright, 1945, Hamilton, 1964, Wilson, 1975), а затем основным инструментом в этой области стала теория игр (Axelrod, Hamilton, 1981, Eshel, Cavalli-Sforza, 1982). Если первые модели рассматривали коэволюцию двух стратегий – «альтруистической» и «эгоистической», не уделяя особого внимания механизмам, способствующим возникновению кооперативного поведения, то в последние годы видна тенденция к более детальному их изучению. Современные модели эволюции кооперативного поведения обычно учитывают пространственные эффекты, а также структуру популяции, и представлены компьютерными моделями, в большинстве случаев базирующимися на теории игр (Nowak, May, 1992, Wilson, Dugatkin, 1997, Riolo, Cohen, Axelrod, 2001).

Аналитические модели эволюции кооперативного поведения позволяют получить наглядные результаты, но за наглядность приходится платить введением дополнительных допущений в модель, таких как: бесконечный размер популяции, ограничение числа возможных стратегий поведения, игнорирование пространственной структуры популяции. В современных компьютерных моделях удастся избавиться от большинства этих

ограничений. Однако, во всех моделях, предложенных до последнего времени, репертуар возможных взаимодействий между агентами очень беден, обычно агент может выбрать одно из двух действий – кооперироваться или не кооперироваться с текущим партнером. Поэтому представляет интерес исследование кооперации и конкуренции при помощи АОМ, в которых агенты обладают достаточно большим набором стратегий поведения и взаимодействуют в пространстве.

В настоящей статье характеризуются работы по агент-ориентированным моделям с конкурирующими агентами, у которых в процессе эволюции исчезали «гены агрессивности», что приводило к резкому увеличению численности многоагентной популяции (Бурцев, 2002, Бурцев, Редько, 2002, Редько, 2004). Также будут проанализированы перспективы развития этих работ.

### **Модель эволюции конкурирующих агентов**

В (Бурцев, 2002, Бурцев, Редько, 2002) была построена и исследована АОМ эволюционного возникновения целенаправленного адаптивного поведения. Модель представляет собой искусственный мир в двухмерном замкнутом пространстве. Пространство разбито на клетки, в которых могут находиться агенты и их пища. В одной клетке не может быть больше одного агента. В клетках с некоторой вероятностью появляется пища, потребляемая агентами. Каждый агент имеет внутренний энергетический ресурс  $R$  ( $R \geq 0$ ). Ресурс пополняется при питании и, возможно, при борьбе с другими конкурентами, а расходуется при выполнении других действий.

Опишем принципы работы отдельного агента. Сенсорная система агента обеспечивает восприятие внешнего мира из поля зрения агента (рис. 1) и снабжает агента информацией о его внутреннем состоянии. Агент ориентирован в пространстве. У агента задано направление «вперед», относительно которого ориентировано его поле зрения, и определены действия, совершаемые им. Поле зрения агента состоит из 4-х клеток: той клетки, в которой агент находится, а также клеток, расположенных впереди агента, справа и слева от агента. В своем поле зрения агент может видеть как пищу, так и других агентов. Кроме информации о состоянии клеток в поле зрения, агент получает информацию о своем текущем внутреннем ресурсе  $R$  и изменении ресурса  $\Delta R$ .

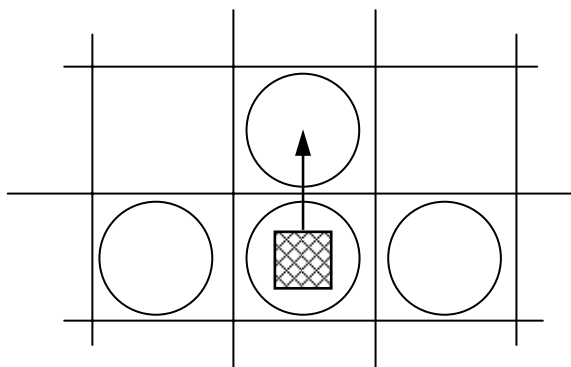


Рис. 1. Поле зрения агента. Стрелкой показано направление «вперед», окружностями отмечены клетки, из которых агент получает информацию, квадратом обозначена клетка, в которой находится агент.

Рассматривается случай дискретного времени,  $t = 0, 1, 2, \dots$ . В каждый такт времени агент совершает строго одно действие. Эти действия таковы: 1) питаться, 2) двигаться на одну клетку вперед, 3) повернуть налево, 4) повернуть направо, 5) отдыхать (ничего не делать), 6) делиться (размножаться), 7) ударить агента в клетке спереди (напасть), 8) защищаться.

Одним из действий, которое может совершать агент, является деление. При делении потомок агента наследует измененную мутациями систему управления родителя и часть его энергии.

Если в течение жизни агента его энергетический ресурс уменьшается до 0, то агент погибает.

Используем следующие обозначения:  $\Delta R$  – изменение ресурса агента за один такт времени;  $k_i$  – параметры, характеризующие изменение внутреннего энергетического ресурса ( $k_i \geq 0$ ). Ресурс агента ограничен:  $R \leq R_{max}$ , где  $R_{max}$  – максимальное (достаточно большое) значение ресурса агента.

Выполнение действий приводит к следующим изменениям ресурса агента  $R$ :

1) Отдых (нахождение в состоянии покоя):  $\Delta R = -k_1$ .

2) Движение:  $\Delta R = -k_2$ .

3) Поворот (направо или налево):  $\Delta R = -k_3$ .

4) Питание:  $\Delta R = -k_4 + k_5$ .

5) Действие деления:  $\Delta R = -k_6$ .

При появлении потомка родитель передает ему часть своей энергии:  $\Delta R_p = -0.5R_p$ . Начальный ресурс потомка  $R_o$  равен полученной от родителя энергии  $R_o = 0.5R_p$ . Здесь индексы  $p$  и  $o$  обозначают родителя и потомка, соответственно.

6) При нападении на другого агента:  $\Delta R = 0.5k_7$ , если жертва не защищается, и  $\Delta R = -k_7$  в противном случае.

7) При защите от другого агента:  $\Delta R = -k_8$ .

Если при выполнении действий оказалось, что  $R > R_{max}$ , то полагается просто  $R = R_{max}$ .

Система управления агента представляет собой однослойную нейронную сеть, состоящую из рецепторных (входных) и эффекторных (выходных) модулей (рис. 2). Сигналы рецепторов поступают на вход нейронной сети, сигналы с выходов нейронной сети – на ее эффекторы. Набор модулей, а также параметры связи между ними определяются геномом агента. Геном агента  $\mathbf{G}$  состоит из двух хромосом  $\mathbf{G} = (\mathbf{W}, \mathbf{M})$ . Первая хромосома содержит веса синапсов нейронной сети. Наличие или отсутствие модуля в структуре сети определяется значением соответствующего двоичного числа (1 или 0) во второй хромосоме. Геном агента  $\mathbf{G}$  в течение его жизни не меняется.

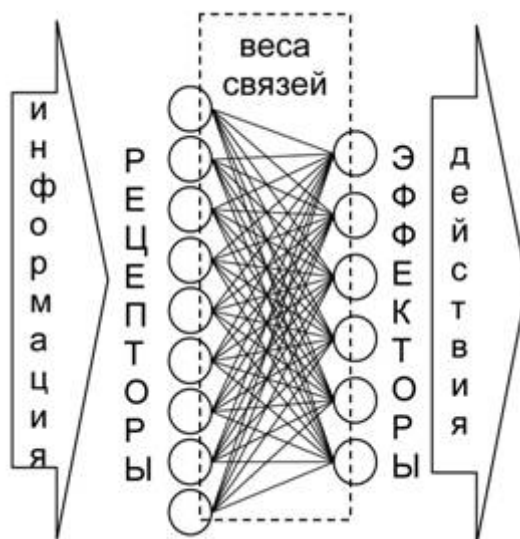


Рис. 2. Структура нейронной сети агента.

На входы нейронной сети агента подаются следующие сигналы:

- 1) сигналы о наличии пищи в поле зрения агента (в клетке агента, впереди, слева, справа);
- 2) сигналы о наличии другого агента в поле зрения (впереди, слева, справа);
- 3) текущее значение внутреннего энергетического ресурса  $R$  агента;
- 4) разность между максимальным  $R_{max}$  и текущим значениями  $R$  ресурса;
- 5) изменение ресурса  $\Delta R$ ;
- 6) вспомогательный постоянный входной сигнал.

Значения на выходах нейронной сети  $y_j$  определяются выражением:

$$y_j = \sum_i W_{ij} x_i ,$$

где  $x_i$  – входы  $j$ -го нейрона, а  $W_{ij}$  – его синаптические веса. Число входов каждого нейрона равно 11, т.е. числу различных сенсорных сигналов. Число выходных нейронов в нейросети агента равно 8 – числу его различных действий. Агент выполняет то действие, которое соответствует выходу, имеющему максимальное значение  $y_j$ .

Все агенты образуют популяцию. Популяция агентов эволюционирует во времени за счет вариаций структуры и весов синапсов управляющей нейронной сети и отбора тех агентов, которые достаточно быстро набирают ресурс и размножаются.

Вариация генома происходит в результате мутаций, которые состоят в следующем:

- 1) добавление к каждому весу  $W_{ij}$  случайной величины, равномерно распределенной на интервале  $[-p_m, p_m]$ , где  $p_m$  – интенсивность мутаций весов синапсов;
- 2) изменение числа  $M_j$ , определяющего наличие того или иного модуля, при этой мутации с вероятностью  $p_s$  происходит удаление или добавление сенсора или эффектора.

### Результаты моделирования

В процессе компьютерных экспериментов была показана возможность возникновения иерархии целей у агентов в процессе искусственной эволюции. В эволюционно устойчивой популяции *метацель* отдельного агента есть «выживание вида». Метацель определяет цели его существования – получения энергии и размножения. Эти цели, в свою очередь, могут быть разбиты на *подцели*. Упрощенная иерархия целей популяции и агентов изображена на рис. 3.



Рис. 3. Иерархия целей, возникающая в процессе компьютерного эксперимента.

В начале каждого эксперимента мир заселялся популяцией агентов, имеющих минимальный набор рецепторов и эффекторов: агент популяции мог видеть пищу в той клетке, в которой он находился, и в клетке, находящейся перед ним, а также совершать

следующие действия – есть, двигаться и делиться. Веса синапсов были заданы таким образом, чтобы обеспечить агенту два начальных инстинкта – питания и размножения. Если агент видел пищу в своей клетке, то он должен был выполнять действие «питаться», если в соседней клетке, то двигаться в эту соседнюю клетку; если он не видел ничего, то выполнялось действие «делиться». Такие агенты начальной популяции обладали примитивной стратегией, в которой учитывается только наличие пищи в поле зрения. Общая структура их целей представлена на рис. 4.

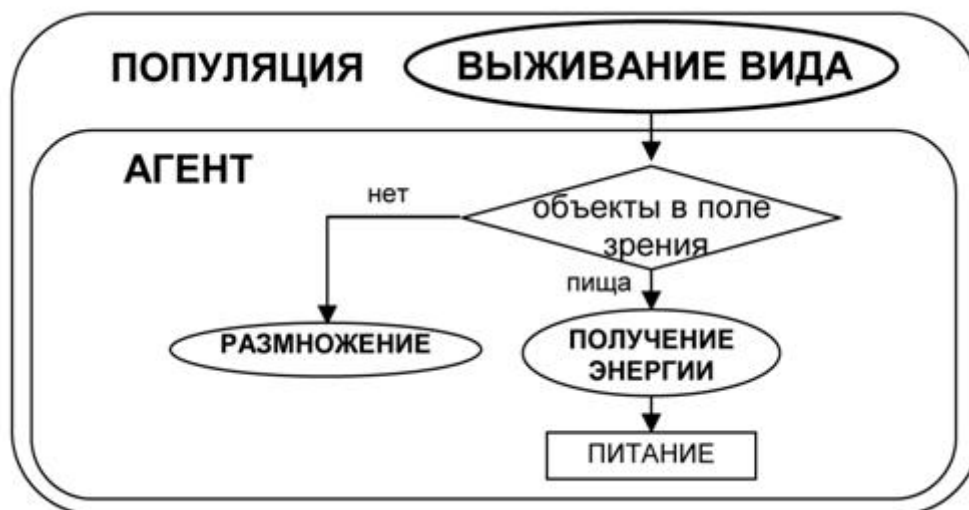


Рис. 4. Схема подцелей агента начальной популяции.

В процессе эволюции в популяции агентов вырабатывается поведение, соответствующее более сложной иерархии целей, в которой уже играют роль все сенсоры эффекторы (рис. 5).

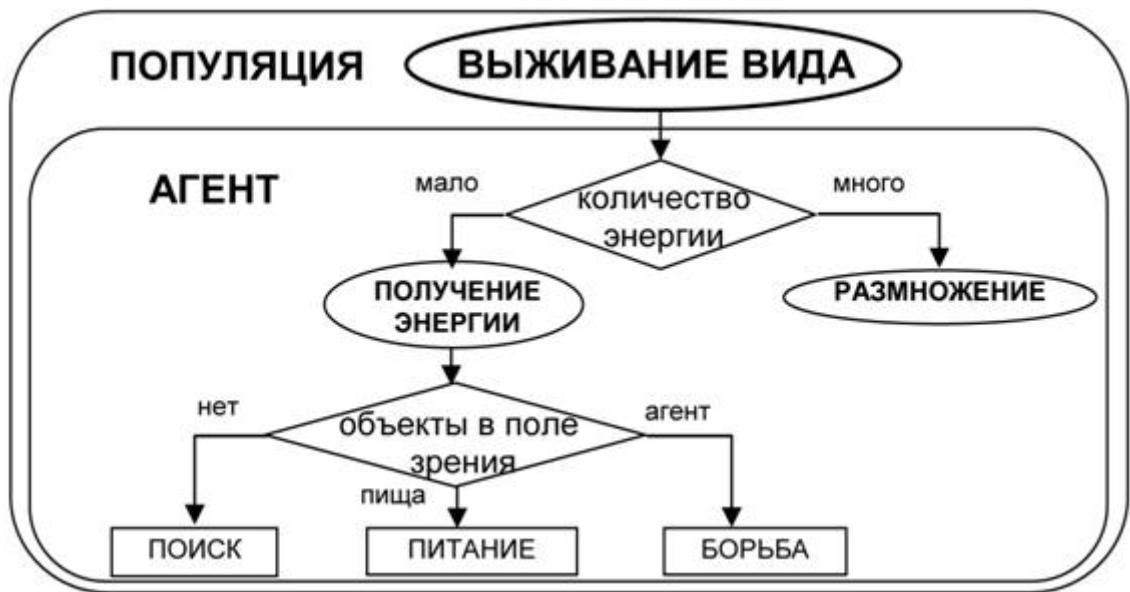


Рис. 5. Схема выбора подцелей, сформированная в процессе эволюции агентов.

Но самое интересное заключалось в том, что при исследовании этой модели можно было наблюдать эффекты, связанные с агрессивной конкуренцией между агентами. В некоторых компьютерных экспериментах наблюдались неожиданные пики в зависимостях численности популяции агентов от времени (рис. 6, нижняя кривая). Анализ системы управления агентов продемонстрировал, что пики соответствовали тем моментам времени, когда в нейронной сети агентов отсутствовали эффекторы, ответственные за борьбу между агентами. Для подтверждения этого полная модель (с борьбой между агентами) сравнивалась с моделью, в которой эффекторы борьбы были полностью устранены из системы управления агентов (рис. 6, верхняя кривая). Видно, что в случае такого «глобального пацифизма» установившаяся численность популяции была примерно в 2 раза выше, чем для обычных агентов, имеющих средства для борьбы между собой. Этот эффект связан с тем, что наличие агрессивной конкуренции приводило к тому, что агенты тратили свой ресурс  $R$  именно на борьбу друг с другом. Этим агентам не хватало ресурса на «созидательную» жизнь, для активного накопления ресурса и расходования его на процессы размножения, приводящие к возрастанию численности популяции. Таким образом, устранение борьбы между агентами, исчезновение «генов агрессивности» приводит к увеличению численности популяции агентов.

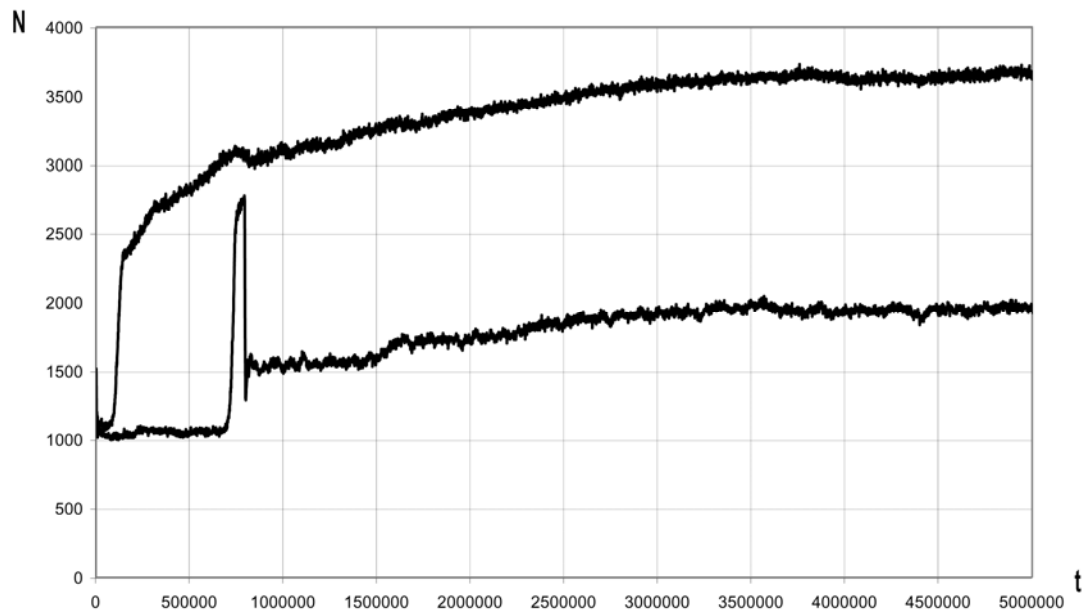


Рис. 6. Зависимость численности популяции  $N$  от времени  $t$  в полной модели (нижняя кривая) и в случае «глобального пацифизма» (верхняя кривая).

Необходимо подчеркнуть, что наблюдавшийся при этом эффект исчезновения «генов агрессивности» носил кратковременный характер (см. нижнюю кривую на рис. 6). Кратковременность была связана с тем, что мутационное появление новых агрессивных агентов сразу же приводило к тому, что агрессивные агенты вели активную борьбу с «мирными» агентами (не имевшими эффекторов борьбы) и выживали их из популяции. Агрессивная конкуренция приводила к уничтожению мирных агентов. Выживали только агенты, имеющие средства для агрессивной конкуренции.

Тем не менее, при модификации данной модели наблюдалось формирование популяций, в которых мирные агенты могли существовать длительное время (Бурцев, 2005, Burtsev, Turchin, 2006). Это было обусловлено следующим. Промоделированные в (Бурцев, 2005, Burtsev, Turchin, 2006) агенты имели векторы-маркеры, первоначально заданные случайным образом (предполагалось также, что в одной клетке могут быть одновременно несколько агентов). Маркеры меняются от родителей к потомкам посредством малых мутаций, следовательно, агенты-потомки имеют маркеры, подобные таковым у агентов-родителей. В процессе эволюции в результате мутаций и отбора возникает родственное подобие маркеров для агентов, являющихся потомками одного и того же родителя. Это приводит к тому, что в конкурентной борьбе агенты, имеющие подобные маркеры (фактически потомки одного и того же родителя), имеют сходные тактики поведения. Родственным агентам невыгодно бороться друг с другом. Отметим,



что невыгодность борьбы между родственниками возникала «сама собой», в процессе эволюционной самоорганизации популяции агентов.

В эволюционирующей популяции наблюдалось несколько разных видов агентов (с разными маркерами), которых в соответствии с их поведением можно назвать «ястребами», «голубями», «воронами», «буржуа», «скворцами». «Ястребы» и «голуби» – аналог хищников и жертв в эволюционной теории игр, остальные стратегии относятся к более сложным формам поведения. Например, «вороны» не нападают на агентов своего вида, но могут нападать на агентов другого вида («ворон ворону глаз не выклюет»). Наиболее интересна стратегия «скворца». «Скворцы» – умеренно агрессивные агенты, которые, как стая птиц, могут дружно защищаться от агрессивных, хищных агентов другого вида. В этой модели наблюдались процессы, в которых при достаточно большом количестве общего питательного ресурса среды  $C$  появлялись субпопуляции неагрессивных по отношению друг к другу «скворцов». При этом численность популяции существенно возрастала по сравнению с популяцией агентов без маркеров (рис. 7).

Таким образом, использование агентов с маркерами при достаточно большом количестве питательного ресурса  $C$  в среде позволяет формировать виды неагрессивных агентов, таких как агенты-скворцы. Необходимо отметить, что при моделировании эволюции популяции агентов-скворцов (Бурцев, 2005, Burtsev, Turchin, 2006) в результате мутаций могли появляться агрессивные агенты и уничтожать мирных. Тем не менее, было показано, что при больших значениях общего ресурса  $C$  мирные агенты в популяции составляют существенную ее часть.

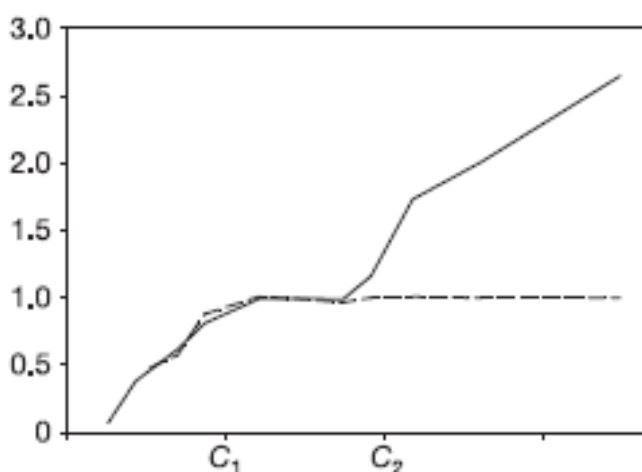


Рис. 7. Зависимость средней плотности популяции агентов от количества ресурса  $C$  в среде (Бурцев, 2005, Burtsev, Turchin, 2006). Штриховая кривая – случай популяции агентов без маркеров, сплошная линия соответствует популяции агентов с маркерами, в этой популяции есть большое количество неагрессивных «скворцов».

## Заключение

Исследование компьютерных моделей показывает, что при эволюции популяции многоагентной системы возможно возникновение мирных, неагрессивных видов агентов. Появление таких мирных видов агентов явно наблюдается в популяции агентов, имеющих маркеры. В этом случае потомки имеют маркеры, сходные с маркерами родителей, и поведение, сходное с поведением родителей. Фактически формируются виды подобных друг другу агентов. В результате мирные, неагрессивные агенты не тратят свой ресурс на борьбу друг с другом, и в процессе эволюции образуются популяции достаточно большой численности.

Подчеркнем, что имеются интересные направления развития изложенных моделей. Во-первых, возможны дальнейшие исследования уже разработанных моделей. Эти исследования могут включать в себя 1) анализ общих характеристик эволюции многоагентных систем путем построения обобщающих моделей на основе дифференциальных уравнений, 2) замену нейронных сетей систем управления агентов более простыми классифицирующими системами (Holland et al, 1986, Butz, Hoffmann, 2002) и изучение эволюционных процессов в таких многоагентных популяциях. Во-вторых, возможен анализ процессов исчезновения агрессивной конкуренции для различных социально-экономических приложений: для популяций конкурирующих фирм, регионов, государств. Отметим, что во втором случае важно исследовать не только маркеры, позволяющие эволюционно формировать субпопуляции сходных агентов, но и «сознательные» формы устранения агрессивной конкуренции. Иначе говоря, маркеры, определяющие сходство, родство между агентами должны быть заменены определенными формами взаимопонимания, позволяющими устранять агрессию между группами агентов, которые моделируют фирмы, нации, государства.

## Литература

- Бурцев М.С. Модель эволюционного возникновения целенаправленного адаптивного поведения. 2. Исследование развития иерархии целей // Препринт ИПМ РАН, 2002, № 69. <http://mbur.narod.ru/publ/>
- Бурцев М.С. Исследование новых типов самоорганизации и возникновения поведенческих стратегий // Диссертация на соискание степени к.ф.-м.н., Москва, ИПМ РАН. 2005. <http://mbur.narod.ru/diss/>

Бурцев М.С., Редько В.Г. Влияние агрессии на эволюцию в многоагентной системе // Сб. трудов 9-ой Международной конференции «Проблемы управления безопасностью сложных систем». М., ИПУ. 2002. <http://mbur.narod.ru/publ/>

Макаров В.Л. Искусственные общества // Искусственные общества, 2006. Т.1, № 1. С. 10-24. <http://www.artsoc.ru/docs/Journal/1.pdf>

Редько В. Г. Модели адаптивного поведения – естественнонаучный подход к развитию информационных технологий // Информационные технологии и вычислительные системы, 2004, № 1, С. 19-43.

Тарасов В.Б. От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика. М.: Эдиториал УРСС, 2002. 352 с.

Axelrod R., Hamilton W.D. The evolution of cooperation // Science, 1981. V.211, pp.1390-1396.

Burtsev M.S., Turchin P.V. Evolution of cooperative strategies from first principles // Nature, 2006. V. 440, No 7087, pp. 1041-1044.

Butz, M.V., Hoffmann J. Anticipations control behavior: Animal behavior in an anticipatory learning classifier system // Adaptive Behavior, 2002. Vol. 10, No 2, pp. 75-96.

Eshel I., Cavalli-Sforza L.L. Assortment of encounters and evolution of cooperativeness // Proc. Nat. Acad. Sci. USA. (Part 1: Biological Sciences), 1982. V.79, No 4, pp.1331-1335.

Hamilton W.D. The genetical evolution of social behavior, I and II // J. Theor. Biol., 1964. V.7, pp.1-52.

Holland J.H., Holyoak K.J., Nisbett R.E., Thagard P. Induction: Processes of Inference, Learning, and Discovery. Cambridge, MA: MIT Press, 1986.

Nowak M.A., May R. M. Evolutionary games and spatial chaos // Nature, 1992. V.359, pp.826-829.

Riolo R., Cohen M.D., Axelrod R. Evolution of cooperation without reciprocity // Nature, 2001. V.414, pp.441-443.

Wilson D.S. A theory of group selection // Proc. Nat. Acad. Sci. USA. 1975. V.72, No 1, pp.143-146.

Wilson D.S., Dugatkin L.A. Group selection and assortative interactions // Amer. Natur., 1997. V.149, No 2, pp.336-351.

Wright S. Tempo and mode in evolution: A critical review // Ecology, 1945. V.26, No 4, pp.415-419.