

МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И КОНКУРЕНЦИИ МЕЖДУ ДВУМЯ ВИДАМИ АВТОНОМНЫХ АГЕНТОВ

В. Г. Редько

Федеральное государственное автономное учреждение «Федеральный научный центр
Научно-исследовательский институт системных исследований Национального исследовательского
центра «Курчатовский институт», г. Москва, Российская Федерация
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3748-2379>,  vgredko@gmail.com

Аннотация: в этой работе строится и исследуется модель взаимодействия между двумя видами автономных агентов. В модели предполагается, что в клеточном мире «живут» два вида агентов: сильные агенты-хищники и относительно слабые мирные агенты. Мирные агенты в обычной жизни не нападают на других агентов, но они способны коллективно противодействовать отдельным хищникам. Мирные агенты занимают определенный участок освоенной ими территории, территории своего коллектива. Каждый агент имеет свой ресурс. Имеются порции пищи мирных агентов. Съедая порцию пищи, мирный агент пополняет свой ресурс. Агенты-хищники могут нападать на мирных агентов, убивать и съедать их. Если агент-хищник убивает и съедает мирного агента, то ресурс хищника значительно увеличивается. Мирные агенты могут большим коллективом одновременно угрожать агенту-хищнику, который пришел на участок коллектива мирных агентов. Для согласованности действий мирных агентов эти агенты выбирают в своем коллективе агента-лидера, который подает команды всем мирным агентам собраться в определенном месте, а затем коллективно угрожать агенту-хищнику, вытесняя его с участка мирных агентов. В настоящей работе продемонстрирована способность большого коллектива относительно слабых мирных агентов противостоять сильным агентам-хищникам.

Ключевые слова: взаимодействия между агентами, мирные агенты, агенты-хищники, угрожать агентам, уходить от угрожающих агентов.

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ по теме № FNEF-2024-0001 «Создание и реализация доверенных систем искусственного интеллекта, основанных на новых математических и алгоритмических методах, моделях быстрых вычислений, реализуемых на отечественных вычислительных системах» (1023032100070-3-1.2.1). Автор благодарен Б. В. Крыжановскому за плодотворные дискуссии.

Для цитирования: Редько В. Г. Модель взаимодействия и конкуренции между двумя видами автономных агентов. *Успехи кибернетики*. 2025;6(1):128–136.

Поступила в редакцию: 08.11.2024.

В окончательном варианте: 11.12.2024.

A MODEL OF INTERACTION AND COMPETITION BETWEEN TWO TYPES OF AUTONOMOUS AGENTS

V. G. Redko

Scientific Research Institute for System Analysis of the National Research Centre “Kurchatov Institute”,
Moscow, Russian Federation
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3748-2379>,  vgredko@gmail.com

Abstract: this work constructs and studies a model of interaction between two types of autonomous agents. The model assumes that strong, predatory agents and relatively weak defensive agents coexist in a cellular world. Defensive agents typically do not attack others but can collectively resist a predator. They occupy a specific area of the world known as the “defensive agent domain”. Each agent has its resources, and defensive agents can replenish their resources by eating portions of food. Predator agents can attack, kill, and eat defensive agents, significantly increasing their resources when they succeed. A large group of defensive agents can pose a threat to a predator that enters their area. To coordinate their actions, defensive agents elect a leader. Upon encountering a predator, the leader commands the defensive agents to gather in a specific location and then collectively threaten the predator, driving it out of their area. This work demonstrates that a large group of relatively weak defensive agents can successfully resist strong predator agents.

Keywords: interactions between agents, defensive agents, predatory agents, threatening agents, escaping from threatening agents.

Acknowledgements: this study is a part of the government contract No. FNEF-2024-0001 Development and Implementation of Trusted AI Systems Using New Mathematical and Algorithmic Methods; Fast Computing Models on Domestic Hardware with the Kurchatov Institute (1023032100070-3-1.2.1). The author thanks B. V. Kryzhanovsky for helpful discussions.

Cite this article: Redko V. G. A Model of Interaction and Competition Between Two Types of Autonomous Agents. *Russian Journal of Cybernetics*. 2025;6(1):128–136.

Original article submitted: 08.11.2024.

Revision submitted: 11.12.2024.

Введение

Модели взаимодействия и конкуренции между автономными агентами начали активно изучаться в начале 1990-х годов, когда возникло направление исследований «Искусственная жизнь» (английское название Artificial Life или ALife) [1, 2]. В этом направлении интенсивно развивались компьютерные модели автономных агентов. Охарактеризуем некоторые модели, в которых рассматривалось конкурентное взаимодействие между агентами.

В работе [3] была исследована многоагентная компьютерная модель PolyWorld, в которой рассматривалась эволюция популяции достаточно сложных агентов, имеющих нейронные сети в качестве систем внутреннего управления поведением агентов. Агенты жили в двумерной клеточной среде, в части клеток была пища агентов. Агенты выполняли следующие действия: питаться, двигаться, бороться, скрещиваться. В этой модели рассматривались агенты-хищники, которые могли нападать на других агентов, отнимать у них энергетический ресурс и убивать агентов, причем каркас умерших агентов превращался в пищу для других агентов. В процессе эволюции в модели PolyWorld формировались определенные стратегии поведения. Одну из стратегий можно условно назвать «ленивый каннибал»: агент крутится на месте, скрещиваясь или вступая в борьбу с каждым, кто приблизится (поедая каркас соперника в случае победы или погибая в случае поражения). Модель PolyWorld изучалась в ряде дальнейших работ, в которых детально анализировались структуры нейронных сетей рассматриваемых эволюционирующих агентов (см., например, [4]).

В работе [5] изучалась эволюция популяции агентов в двумерной клеточной среде, в которой были агенты-хищники с фиксированными свойствами, которые могли нападать на основных агентов, менявшихся в процессе обучения и эволюции. Основное внимание в [5] уделялось анализу взаимоотношения между обучением и эволюцией.

Модель Echo [6, 7] описывает эволюцию простых агентов, которые взаимодействуют между собой путем скрещивания, борьбы и торговли. Взаимодействия между агентами в этой модели приводило к формированию различных экологических систем: «войны миров», симбиозов и т.п.

В работе [8] изучалось поведение агентов с несколькими потребностями, в том числе с потребностью защиты от хищников.

В настоящей работе строится и исследуется модель конкурентного взаимодействия между двумя видами автономных агентов. Рассматриваются два вида агентов: сильные агенты-хищники и относительно слабые мирные агенты. Мирные агенты в обычной жизни не нападают на других агентов, но они способны коллективно противодействовать отдельным хищникам. Предшественником настоящей модели является работа [9], в которой исследовалась довольно сложная модель эволюционной самоорганизации и процессов формирования видов в популяции агентов. В частности, в некоторых случаях наблюдалась борьба коллектива сравнительно слабых агентов с более сильным агентом. В настоящей работе свойства такой борьбы анализируются в более четком и явном виде. По сравнению с охарактеризованными выше работами мы сосредоточимся на свойствах борьбы мирных агентов с сильными агентами-хищниками.

Описание модели

Рассматриваем одномерный клеточный мир, в котором находятся агенты. Число клеток в мире равно N . Имеется два вида агентов: 1) мирные агенты и 2) агенты-хищники. В каждой клетке мира могут находиться несколько агентов. Время t дискретно: $t = 1, 2, \dots$. Каждый агент имеет свой ресурс, ресурсы мирных агентов и агентов-хищников обозначаем $r(t)$ и $R(t)$, соответственно.

В клетках мира имеются порции пищи мирных агентов. При этом в части мира плотность пищи выше, эта часть мира предпочтительна для мирных агентов. Считаем, что предпочтительная для мирных агентов часть мира занимает половину клеток мира, это клетки с номерами $1, 2, \dots, N/2$. Эту

предпочтительную для мирных агентов часть мира будем называть участок мирных агентов. Число клеток с порцией пищи в предпочтительной части мира равно M_1 , в остальной части мира число клеток с порцией пищи равно M_2 ($M_2 < M_1 < N/2$). В начальный момент времени ($t = 1$) порции пищи распределены по клеткам случайно. При $t = 1$ все мирные агенты находятся в случайных клетках своего участка мира.

Опишем действия агентов.

Мирные агенты могут выполнять следующие действия: 1) питаться, 2) перемещаться по своему участку мира, 3) угрожать агенту другого вида, если этот чужой агент пришел на участок мирных агентов, 4) нападать на агента другого вида. При питании агента ресурс этого агента пополняется. При выполнении других действий ресурс агента понижается.

Действие питание состоит в следующем. Если в той клетке, в которой находится мирный агент, имеется порция пищи, то агент может съесть эту порцию. При этом он съедает всю порцию пищи сразу. При съедании агентом пищи в одной клетке, новая порция пищи появляется в случайной свободной от еды клетке в той части мира, в которой находится агент. То есть, число порций пищи в каждой части мира постоянно.

Действие перемещение состоит в передвижении на соседнюю клетку в случайном направлении. Если мирный агент видит агента-хищника, то он может либо убегать от хищника (т.е. перемещаться в сторону, противоположную направлению на хищника), либо угрожать агенту-хищнику или даже нападать на хищника. Понятно, что нападение на хищника имеет смысл, когда мирные слабые агенты нападают на агента-хищника одновременно достаточно большим коллективом.

Агент-хищник может выполнять следующие действия: 1) перемещаться на соседние клетки, 2) нападать на мирного агента, 3) убивать и съедать мирного агента, 4) уходить от коллектива нападающих мирных агентов.

Прирост ресурса мирного агента при съедании одной порции пищи равен Δr_1 . Расходы ресурса мирного агента на перемещение на одну клетку, на угрозу агенту-хищнику, на удар по агенту-хищнику равны Δr_2 , Δr_3 , Δr_4 , соответственно. Считаем, что $\Delta r_2 < \Delta r_3 < \Delta r_4$.

Прирост ресурса агента-хищника при съедании убитого мирного агента равен ΔR_1 . Расходы ресурса агента-хищника на перемещение на одну клетку, на удар по мирному агенту, на убийство мирного агента равны ΔR_2 , ΔR_3 , ΔR_4 , соответственно. Считаем, что $\Delta R_2 < \Delta R_3 < \Delta R_4$.

Считаем, что каждый агент видит других агентов во всех клетках мира. Также считаем, что скорость перемещения агентов-хищников существенно выше скорости перемещения мирных агентов.

Охарактеризуем детали взаимодействий между агентами. Рассматриваем два режима взаимодействия 1) обычный режим, когда мирные агенты не угрожают хищникам и не нападают на хищников, 2) режим с угрозами, когда мирные агенты угрожают одному или нескольким агентам-хищникам, а могут и нападать на хищников.

Сначала рассмотрим обычный режим. Когда агент-хищник видит мирного агента в соседней клетке, то хищник заходит в эту клетку и убивает его (за счет разницы скоростей перемещения мирный агент не успевает убежать от хищника). Если хищник видит нескольких мирных агентов в соседних клетках, то он выбирает в качестве жертвы одного агента случайным образом. Если мирный агент видит хищников (на расстоянии больше одной клетки), то он перемещается в сторону, противоположную направлению на ближайшего хищника.

Теперь рассмотрим режим с угрозами. Когда агент-хищник (или несколько агентов-хищников) приходит на участок мирных агентов (или находится на этом участке), то мирные агенты коллективно угрожают хищнику и стремятся вытеснить хищника со своего участка. То есть, каждый из мирных агентов приближается к хищнику и выполняет действие «угрожать». Если число угрожающих велико, то обычно хищник постепенно перемещается в сторону, противоположную угрожающим, и, в конце концов, уходит с участка мирных агентов.

Возможно, что хищник сочтет, что его силы достаточно велики и остановится в клетке на участке мирных агентов (например, это может случиться, если ресурс хищника достаточно велик). Тогда мирные агенты приблизятся к хищнику и из соседней с ним клетки будут наносить удары по агенту-хищнику. Но агент-хищник может в ответ наносить удары по мирным агентам. Считаем, что сила удара пропорциональна ресурсу ударяющего агента (для мирного агента введем небольшое уточнение: если ресурс мирного агента большой, то его сила удара ограничена, подробнее см. ниже). А

уменьшение ресурса ударяемого агента пропорционально силе удара. Если ресурс какого-либо агента истощился (стал меньше нуля), то такой агент погибает.

Борьбе коллектива мирных агентов с хищниками может способствовать наличие в коллективе агента-лидера, который дает команду мирным агентам на коллективную угрозу агенту-хищнику. А если агент-хищник не уходит с участка мирных агентов при наличии коллективной угрозы, то агент-лидер дает команду на одновременное нападение на хищника, и все мирные агенты одновременно наносят удары по агенту-хищнику. Агент-лидер может выбираться коллективом мирных агентов в соответствии с максимальным ресурсом среди этих агентов. Если агентов с максимальным ресурсом оказалось несколько, то лидер выбирается из этих агентов случайным образом. Наличие агента-лидера в коллективе мирных агентов рассматривается в отдельном варианте модели.

Результаты анализа и моделирования

Опорные параметры моделирования

Предполагаются следующие опорные параметры моделирования. Рассматриваем сначала эти опорные параметры, которые качественно характеризуют свойства агентов, при моделировании эти параметры могут варьироваться. Размер всего мира равен $N = 40$ клеток. Размер участка мирных агентов равен $N_1 = 20$ клеток. Число клеток с порцией пищи на участке мирных агентов равно $M_1 = 8$, в остальной части мира число клеток с порцией пищи $M_2 = 4$. Начальный ресурс каждого мирного агента $r_0 = 1$. Начальный ресурс каждого хищника $R_0 = 10$. Текущее число мирных агентов и агентов-хищников обозначаем $n_1(t)$ и $n_2(t)$. Начальное число мирных агентов равно 10: $n_1(1) = 10$.

Прирост ресурса мирного агента при съедании одной порции пищи $\Delta r_1 = 0.1$. Расход ресурса мирного агента на перемещение на одну клетку $\Delta r_2 = 0.01$. Расход ресурса мирного агента на угрозу агенту-хищнику $\Delta r_3 = 0.02$. Расход ресурса мирного агента на удар по агенту-хищнику $\Delta r_4 = 0.05$.

Прирост ресурса агента-хищника при съедании убитого мирного агента $\Delta R_1 = 1.0$. Расход ресурса агента-хищника на перемещение на одну клетку $\Delta R_2 = 0.02$. Расход ресурса агента-хищника на удар по мирному агенту $\Delta R_3 = 0.1$. Расход ресурса агента-хищника на убийство мирного агента $\Delta R_4 = 0.5$.

При борьбе между агентами двух видов сила удара зависит от ресурса ударяющего агента. Полагаем, что при ударе агента-хищника эта сила равна $F = k_1 R$. А так как ресурс мирного агента может сильно возрасть (см. рис. 1), то считаем при ударе мирного агента сила удара равна $\hat{f} = k_1 r$ при малом ресурсе агента ($r < 3$) и достигает постоянной величины $\hat{f} = 3k_1$, при больших r ($r > 3$), здесь k_1 — коэффициент пропорциональности, R и r — ресурсы хищника и мирного агента, соответственно. Если хищника ударяют сразу несколько мирных агентов, то силы ударяющих агентов суммируются. Так если ресурсы всех ударяющих мирных агентов больше 3, то их общая сила удара равна $\hat{f} = 3k_1 n_f$, n_f — число ударяющих агентов.

Результаты анализа и компьютерного моделирования

Рассмотрим результаты анализа и компьютерного моделирования для нескольких характерных случаев.

Случай без хищников

Сначала рассмотрим случай, когда в мире нет агентов-хищников. В этом случае мирные агенты случайно блуждают по своему участку, питаются, когда встречаются клетки с порциями пищи, и постепенно накапливают ресурс. Прирост ресурса при съедании одной порции пищи мирным агентом равен $\Delta r_1 = 0.1$. Расход ресурса на случайное перемещение на одну клетку по своему участку Δr_2 варьировался. Основной расчет проводился для указанных выше параметров N_1 и M_1 : $N_1 = 20$ и $M_1 = 8$. Усредненная зависимость ресурса мирных агентов от времени (полученная в результате компьютерного моделирования) для $\Delta r_2 = 0.01$ и $\Delta r_2 = 0.02$ представлена на рис. 1. Усредненная зависимость числа мирных агентов от времени для тех же параметров представлена на рис. 2. Видно, что с ростом расхода ресурса на перемещение скорость роста ресурса мирного агента уменьшается, а также при этом происходит некоторое вымирание числа агентов. Если еще увеличивается расход ресурса на перемещение, то агенты вымирают. Например, если расход ресурса на случайное перемещение на одну клетку Δr_2 равен 0.03, то мирным агентам не хватает ресурса на перемещение, и все они достаточно быстро (примерно за 1200 тактов времени) вымирают.

Отметим, что можно было бы рассмотреть размножение мирных агентов (механизм такого размножения мог бы быть таким: когда ресурс мирного агента превышает определенный порог, то этот агент рождает агента потомка и передает ему часть своего ресурса), но поскольку основная цель настоящей работы — анализ взаимодействия между разными видами агентов, то размножение агентов в этой работе не рассматривалось.

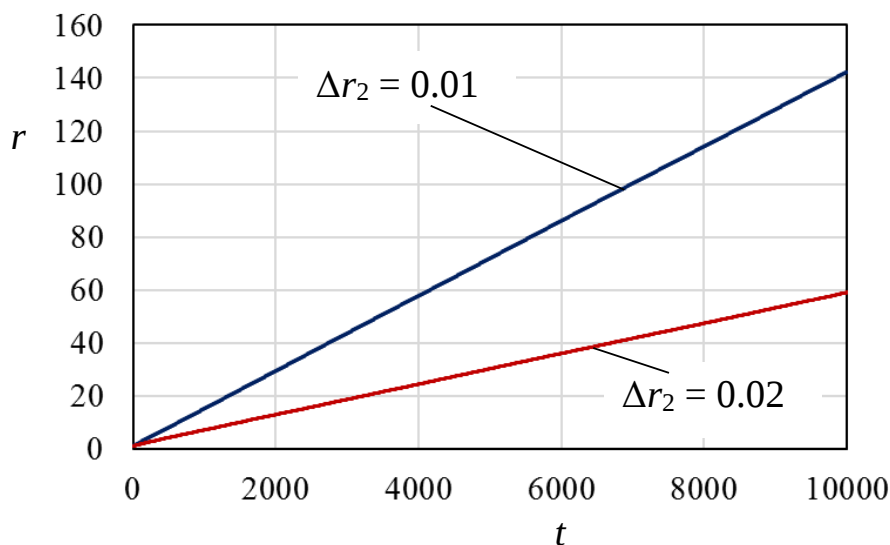


Рис. 1. Усредненная зависимость ресурса мирных агентов r от времени t . Размер участка мирных агентов равен $N_1 = 20$ клеток. Результаты усреднены по 300 различным расчетам

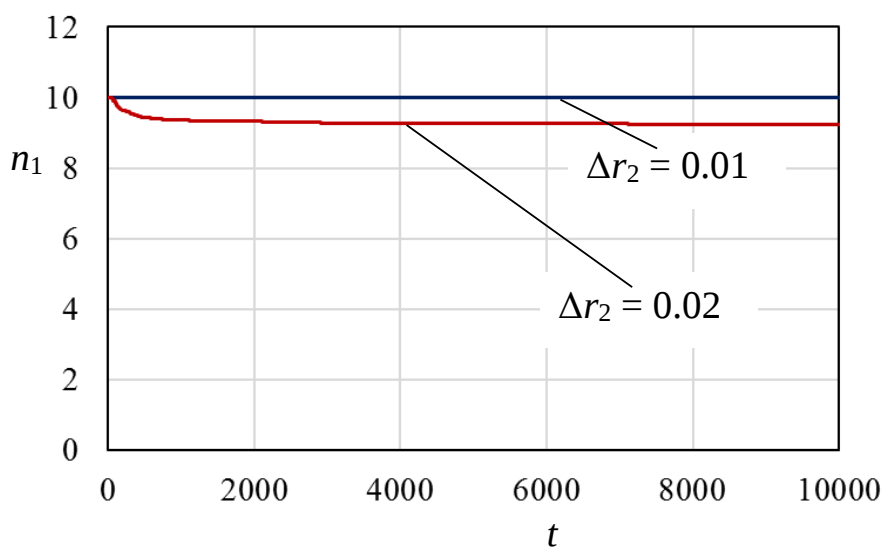


Рис. 2. Усредненная зависимость числа мирных агентов n_1 от времени t . Размер участка мирных агентов равен $N_1 = 20$ клеток. Результаты усреднены по 300 различным расчетам

При моделировании в этом случае была обнаружена интересная особенность поведения мирных агентов. Если участок мирных агентов был увеличен в 5 раз, и число порций пищи на этом участке было также увеличено в 5 раз (т.е. было $N_1 = 100$ и $M_1 = 40$), так что плотность порций пищи оставалась такой же, как и для рассмотренного выше расчета при $N_1 = 20$, то ресурс агентов стал неожиданно уменьшаться. Остальные параметры расчетов были такими же, как и для $N_1 = 20$ и $M_1 = 8$. Усредненные зависимости ресурса и числа агентов от времени для $N_1 = 100$ представлены на рис. 3 и рис. 4 соответственно.

Таким образом, при увеличении участка мирных агентов (при $N_1 = 100$ и $M_1 = 40$) поведение агентов резко отличается от их поведения на меньшем участке (при $N_1 = 20$ и $M_1 = 8$). Анализ резуль-

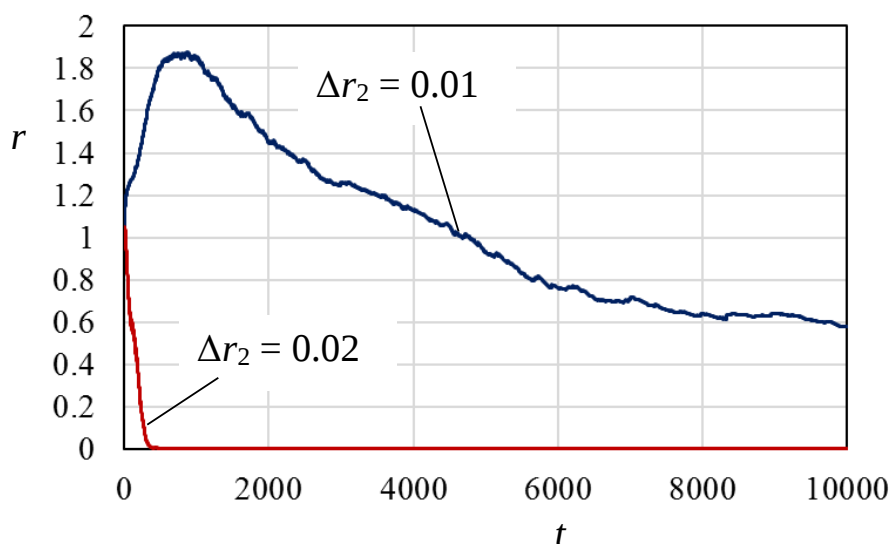


Рис. 3. Усредненная зависимость ресурса мирных агентов r от времени t . Размер участка мирных агентов равен $N_1 = 100$ клеток. Результаты усреднены по 300 различным расчетам

татов компьютерных расчетов при $N_1 = 100$ показал, что при достаточно большом времени на участке мирных агентов порции пищи оказались явно неравномерно распределены: 1) были фрагменты цепочек клеток (длиной примерно 10 клеток), на которых порций пищи не было совсем на ряде смежных клеток фрагмента, 2) были фрагменты цепочек клеток, на которых порции пищи находились в каждой из смежных клеток фрагмента. Для анализа возникновения такой неравномерности расположения порций пищи была сделана следующая оценка. Для каждой клетки участка мирных агентов подсчитывалось число порций пищи на следующих 10 клетках $k(i)$, i — номер рассматриваемой клетки. То есть величины $k(i)$ характеризовали локальную плотность порций пищи в проведенных компьютерных расчетах.

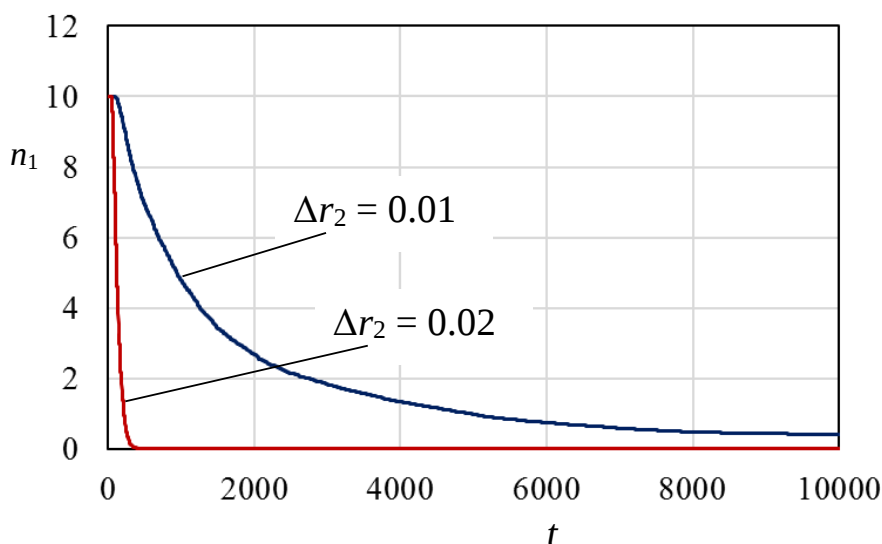


Рис. 4. Усредненная зависимость числа мирных агентов n_1 от времени t . Размер участка мирных агентов равен $N_1 = 100$ клеток. Результаты усреднены по 300 различным расчетам

В среднем величина $k(i)$ для рассматриваемых расчетов k_m была равна 4 (8 порций пищи в 20 клетках). И подсчитывалось среднеквадратическое отклонение $\sigma(t)$ величины $k(i)$ от k_m для рассмотренных расчетов (для основного расчета при $N_1 = 20$ и $M_1 = 8$ и для расчета с неожиданным результатом при $N_1 = 100$ и $M_1 = 40$) для рассматриваемых моментов времени t . Если рассматриваемая клетка была на расстоянии, меньшем 10 от конца участка мирных агентов, то расчет величины $k(i)$ и

среднего значения этой величины k_m велся по меньшему числу клеток. Зависимости $\sigma(t)$ от времени для этих расчетов приведены на рис. 5.

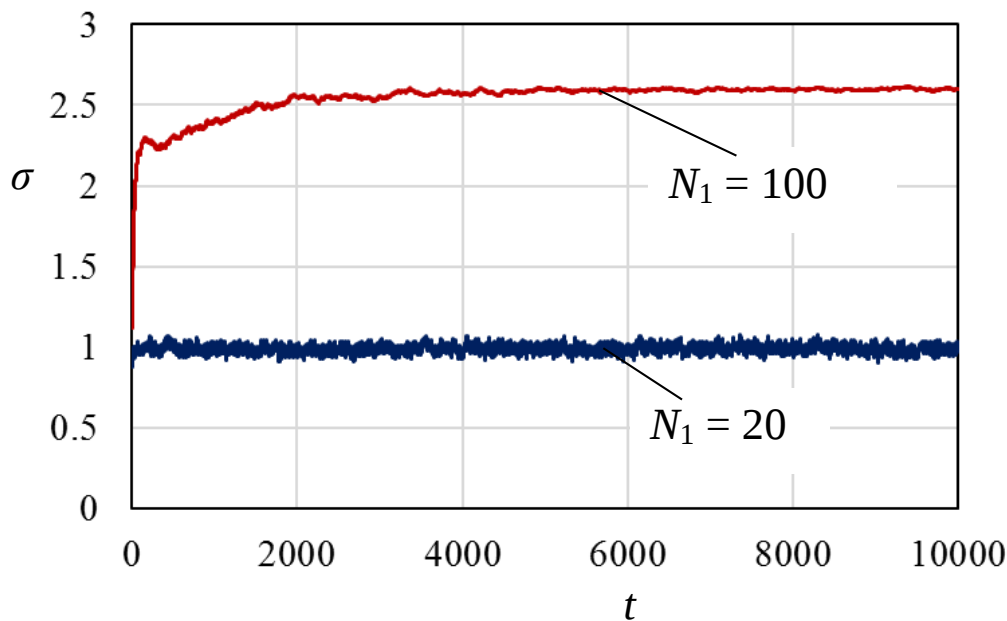


Рис. 5. Усредненная зависимость среднеекватрического отклонения σ величины $k(i)$ от k_m от времени t для основного расчета при $N_1 = 20$ и для расчета с неожиданным результатом при $N_1 = 100$. Для этих расчетов считалось, что величина расхода ресурса при перемещении мирного агента на одну клетку равна $\Delta r_2 = 0.01$. Результаты усреднены по 300 различным расчетам

Величина $\sigma(t)$ характеризует неравномерность распределения порций пищи на участке мирных агентов. Видно, что для основного расчета ($N_1 = 20$) неравномерность есть, но эта неравномерность невелика и практически не меняется со временем. А для расчета при большом числе клеток на участке мирных агентов ($N_1 = 100$) эта неравномерность возрастает со временем и становится значительно больше, чем для основного расчета. Эта большая неравномерность прямо подтверждается отмеченным выше непосредственным наблюдением за числом порций пищи для разных фрагментов цепочек клеток при $N_1 = 100$. Интуитивно понятно, что такая неравномерность может быть связана со спецификой локального перемещения агентов (перемещение состоит в движении на одну из соседних клеток) и агенты способны формировать области с малой плотностью порций пищи и довольно долго оставаться на этих областях, в то же время как на других областях плотность порций пищи может быть достаточно большой. Для дополнительной проверки выбора основного расчета были проведены вспомогательные расчеты при нескольких выборах параметров. Вспомогательные расчеты подтвердили целесообразность выбора основного расчета с параметрами $N_1 = 20$, $M_1 = 8$.

Случай с хищником без агента-лидера

Теперь рассмотрим случай одного хищника без наличия агента-лидера мирных агентов. Считаем, что мирные агенты достаточно долго жили на своем участке, так что их ресурс довольно большой. Ресурс хищников тоже велик. Поэтому малое уменьшение ресурса агентов при их движении не существенно. В рассматриваемом случае хищник часто нападает на мирных агентов, убивает и поедает их. Хотя мирные агенты видят приближение хищника, но поскольку скорость перемещения агента-хищника выше скорости мирных агентов, то мирные агенты не успевают уйти от хищника, подвергаются нападению и погибают. Ресурс агента-хищника при этом возрастает. В этом случае агент-хищник может полностью съесть мирных агентов. Понятно, что при большей численности агентов-хищников, вымирание мирных агентов будет усиливаться. В принципе, можно рассмотреть барьеры на границах мира, например, ввести барьер в клетке номер 1, не позволяющий мирным агентам выходить из своего участка. Тогда возможна такая ситуация, что все мирные агенты, убегая от хищника, соберутся в клетке номер 1. Эти агенты могут коллективно угрожать хищнику и даже наносить удары по нему. Хотя без агента-лидера их действия вряд ли будут одновременными, согласованными между собой. Кроме того,

введение барьера и сбор «загнанных» хищником мирных агентов на границе мира у барьера выглядит несколько искусственным. Поэтому целесообразно рассмотрение более естественного случая мира без барьеров при наличии агента-лидера.

Случай с хищником и с агентом-лидером

Далее рассмотрим случай одного агента-хищника при наличии агента-лидера мирных агентов. Считаем, что хищник приходит в мир через границу в клетке номер N , видит мирных агентов и приближается к ним. В этом случае при появлении агента-хищника в мире агент-лидер дает команду всем мирным агентам собраться в одном месте (в середине участка мирных агентов), а при переходе хищника на участок мирных агентов дает команду: всем мирным агентам коллективно угрожать агенту-хищнику. При этом обычно агент-хищник уходит с участка мирных агентов. Возможно, что агент-хищник может переоценить свои силы и при коллективной угрозе может остановиться, тогда все мирные агенты одновременно нанесут удары по агенту-хищнику и ресурс его значительно уменьшится.

Рассмотрим детали поведения агентов в данном случае. Считаем, что параметры, характеризующие ситуацию, таковы. Число клеток участка мирных агентов и число порций пищи на этом участке равны $N_1 = 20$ и $M_1 = 8$, соответственно. Расход ресурса мирного агента на перемещение на одну клетку равен $\Delta r_2 = 0.01$. Мирные агенты уже провели достаточное большое время на своем участке, питаются и перемещаясь на соседние клетки, так что ресурс одного агента большой: $r > 10$ (см. рис. 1), число этих агентов равно $n_1 = 10$ (см. верхнюю линию на рис. 2). Агент-хищник в определенный момент времени t_p появляется в N -й клетке (наиболее удаленной клетке от участка мирных агентов), видит мирных агентов и начинает двигаться к ним. Скорость этого движения выше, чем скорость мирных агентов, считаем, что, двигаясь к мирным агентам, хищник проходит две клетки за один такт времени. Сразу же после появления агента-хищника на краю мира (при $t = t_p$) агент-лидер мирных агентов подает команду своим мирным агентам всем собраться в центре участка (в 10-й клетке). На этот сбор потребуется 10 тактов времени, за это же время агент-хищник подойдет к участку мирных агентов. После сбора всех мирных агентов, агент-лидер подает команду двигаться в сторону агента-хищника, угрожая ему. Теперь агент-хищник начинает отступать от коллектива мирных агентов, двигаясь уже медленней, со скоростью одна клетка за такт времени. И через 20 тактов времени агент-хищник покинет рассматриваемый мир. Весь процесс вытеснения агента-хищника займет всего 30 тактов времени. Расход ресурса мирного агента при этом составит не более, чем $10\Delta r_2 + 30\Delta r_3 = 0.7$, что значительно меньше накопленного им до этого ресурса. Расход ресурса агента-хищника также небольшой, примерно 0.8. То есть расходы обоих видов агентов значительно меньше, чем имеющиеся у них ресурсы.

Если агент-хищник вдруг остановится и решит бороться с коллективом мирных агентов, то агент-лидер мирных агентов подает команду всем мирным агентам нанести одновременно удары по хищнику. При этом общая сила ударов по хищнику составит $f = 30k_1$, а возможная сила удара хищника равна приближенно (в пренебрежении малыми расходами его ресурса на движение) $10k_1$. То есть коллективные удары мирных агентов значительно сильнее отдельных ударов агента-хищника. Эти коллективные удары значительно уменьшат ресурс хищника и он, естественно, предпочтет уйти от коллектива мирных агентов и покинуть рассматриваемый мир.

Итак, относительно слабые мирные агенты в этом случае коллективно вытесняют сильного агента-хищника со своего участка.

Заключение

Таким образом, в настоящей работе построена и исследована модель взаимодействия между агентами двух видов: 1) мирными относительно слабыми агентами и 2) хищными более сильными агентами. Показано, что мирные агенты могут коллективно вытеснять сильных агентов-хищников со своей хорошо освоенной территории. Необходимо отметить, что для такого вытеснения необходима четкая согласованность большого коллектива агентов. Такую согласованность может обеспечить выбранный мирными агентами агент-лидер, подающий команды на организацию коллективной угрозы агенту-хищнику. Отметим, что подобное коллективное вытеснение хищника происходило, когда многочисленная трубящая стая гусей атаковала лису, вытесняя ее со своей территории [10]. Аналогичная защита своей стаи наблюдалась, когда огромная стая скворцов очень плотно окружала ястреба-перепелятника, лишая его возможности летать [10]. После многократного применения согласованного

коллективного вытеснения сильных агентов со своей территории у мирных агентов может формироваться стереотип атакующего поведения. По-видимому, такой стереотип формировался у скворцов, атакующих хищников.

Итак, основной вывод настоящей работы таков: коллектив относительно слабых агентов способен защищаться от сильных врагов и вытеснять хищников со своей территории.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Artificial Life: The Proceedings of an Interdisciplinary Workshop on the Synthesis and Simulation of Living Systems*. Redwood City CA: Addison-Wesley; 1989. 655 p.
2. *Artificial Life II: Proceedings of the Second Artificial Life Workshop*. Redwood City CA: Addison-Wesley; 1992. 854 p.
3. Yaeger L. S. Computational Genetics, Physiology, Metabolism, Neural Systems, Learning, Vision, and Behavior or PolyWorld: Life in a New Context. *Proceedings of the Artificial Life III Conference*. Addison-Wesley; 1994;17:263–298.
4. Yaeger L., Sporns O., Williams S., Shuai X., Dougherty S. Evolutionary Selection of Network Structure and Function. *Artificial Life XII: Proceedings of the Twelfth International Conference on the Simulation and Synthesis of Living Systems*. Cambridge, Massachusetts, London, England: The MIT Press; 2010:313–320. Режим доступа: <https://dn790008.ca.archive.org/0/items/ArtificialLifeXII/ArtificialLife%20Life%20XII.pdf>.
5. Ackley D., Littman M. Interactions between Learning and Evolution. *Artificial Life II: Proceedings of the Second Artificial Life Workshop*. Redwood City CA: Addison-Wesley; 1992:487–509.
6. Holland J. H. Echoing Emergence: Objectives, Rough Definitions, and Speculations for Echo-class Models. *Complexity: Metaphors, Models and Reality*. Addison-Wesley; 1994:309–342.
7. Hrabar P. T., Jones T., Forrest S. The Ecology of Echo. *Artificial Life*. 1997;3(3):165–190. DOI: 10.1162/artl.1997.3.3.165.
8. Коваль А. Г., Редько В. Г. Поведение модельных организмов, обладающих естественными потребностями и мотивациями. *Математическая биология и биоинформатика*. 2012;7(1):266–273. DOI: 10.17537/2012.7.266.
9. Burtsev M., Turchin P. Evolution of Cooperative Strategies from First Principles. *Nature*. 2006;440(7087):1041–1044. DOI: 10.1038/nature04470.
10. Lorenz K. *On Aggression*. London, New York: Routledge Classics; 2002. 306 p.