

ЭВОЛЮЦИЯ КООПЕРАЦИИ В КОМПЬЮТЕРЕ И СОЦИУМЕ¹

М.С. Бурцев

ИСКУССТВЕННАЯ ЖИЗНЬ

Динамика многих биологических и социальных систем определяется эволюцией в популяциях, поведение агентов в которых сильно варьируется. Широкий спектр стратегий поведения и типов взаимодействий агентов делает невозможным применение для моделирования подобных систем стандартных методов статистики и теории игр. Эта проблема привела к появлению отдельного класса компьютерных моделей, получившего название «Искусственная жизнь».

Главным отличием моделей искусственной жизни является то, что в них агент «живет» и «размножается» в виртуальной среде, при этом вероятность его выживания не задана явно, а определяется в процессе взаимодействия со средой и другими агентами. Такой подход позволяет отказаться от субъективного понимания исследователем меры приспособленности агента (что «хорошо», и что «плохо» для выживания агента), и перейти к анализу эволюционно устойчивых состояний системы популяция-среда.

Подобная модель может обладать поведением, по сложности приближающимся к прототипу, но в отличие от экспериментов с реальной живой или социальной системой (которые не всегда осуществимы), эксперименты с компьютерной моделью легко воспроизводимы, и все изменения в эволюции системы могут быть зафиксированы для последующего анализа. Таким образом, модели искусственной жизни могут быть использованы непосредственно при исследовании сложных систем, или в качестве полигона для построения и исследования аналитических моделей.

Исследования в рамках искусственной жизни являются продолжением пионерских работ по теории самовоспроизводящихся автоматов [1], игр автоматов [2] и компьютерного моделирования эволюции [3]. С момента своего возникновения, искусственная жизнь тесно связана с синергетикой и нелинейной динамикой, не случайно первый сборник статей в этой области вышел в журнале *Physica D «Nonlinear Phenomena»* [4]. И сегодня, синергетика и искусственная жизнь, широко использующая представления о самоорганизации и динамических системах, имеют общее направление движения [5,6]. Методы искусственной жизни активно используются в работах по моделированию эволюции когнитивных способностей животных [7], в областях эволюционной роботики и эволюционных вычислений [8].

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект 04-01-00510.

КООПЕРАЦИЯ

Кооперативное поведение животных хорошо вписывается в эволюционную теорию, если кооперирующиеся особи принадлежат разным видам, и взаимоотношения между ними носят характер симбиоза. Но кооперация также широко распространена и между особями одного вида, несмотря на то, что они занимают одну и ту же экологическую нишу, и, следовательно, конкуренция между ними максимальна. Кроме того, если в популяции кооператоров появляются особи, пользующиеся преимуществами кооперации, но не участвующие в ней и поэтому не несущие затраты на подобное поведение, то они обладают преимуществом по сравнению с кооператорами, что приводит к вымиранию последних. Все это ставит серьезную проблему перед теорией естественного отбора.

Самая известная теория эволюции альтруизма – теория *родственного отбора* [9]. Основная идея которой заключается в том, что кооперация возможна, если выполнено условие:

$$rb > c,$$

где r – мера генетической близости, b – выигрыш объекта кооперативного поведения, а c – затраты самого животного.

Сегодня эволюция кооперации исследуется с использованием как аналитических моделей, так и компьютерного моделирования. Первые позволяют получить наглядный результат, но за наглядность приходится платить введением дополнительных допущений в модель, таких как: бесконечный размер популяции, ограничение числа возможных стратегий поведения, игнорирование пространственной структуры популяции. Современные компьютерные модели позволяют избавиться от большинства этих ограничений. Однако, во всех моделях, предложенных до сегодняшнего дня, 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 при помощи модели искусственной жизни, в которой агенты обладают достаточно большим набором стратегий поведения и взаимодействуют в пространстве.

В следующем разделе будет представлена модель, в которой агенты имеют наследуемые фенотипические признаки. В модели, зависимость стратегии поведения агента от фенотипического признака партнера по взаимодействию эволюционирует так же, как и зависимость стратегии поведения от любой другой входной переменной. Агенты моделируемой популяции могут свободно перемещаться в пространстве, что открывает возможность эволюционной самоорганизации пространственной структуры популяции. Таким образом, предложенная модель позволяет исследовать эволюционное возникновение и развитие кооперации, вызванные родственным отбором (наследуемость фенотипического признака) и неоднород-

ностью пространственных взаимодействий (возможность изменения агентом своего положения в пространстве).

КООПЕРАЦИЯ В МОДЕЛИ ИСКУССТВЕННОЙ ЖИЗНИ

Модели искусственной жизни концептуально близки к моделям коллективного поведения автоматов, что позволяет при их изложении позаимствовать стиль из теории автоматов[2].

Рассмотрим популяцию \mathfrak{P} агентов \mathfrak{A} , эволюционирующую в среде U . Поведение отдельного агента \mathfrak{A} задается следующим образом:

$$\varphi(t) = \Phi(\mathbf{s}(t)), \quad (1)$$

$$f(t) = F(\varphi(t)), \quad (2)$$

здесь φ – вектор внутренних состояний агента \mathfrak{A} ; \mathbf{s} – вектор входных переменных; f – выходная переменная. В уравнениях (1) и (2) переменная t имеет смысл времени и принимает целочисленные значения $t = 1, 2, \dots$. Значения входных переменных \mathbf{s} определяются текущим состоянием, окружающей агента среды. Будем считать, что выходная переменная f принимает n дискретных значений f_1, f_2, \dots, f_n , и называть эти значения *действиями*. Так, если в момент времени t выходная переменная принимает значение $f(t) = f_\alpha$, мы будем говорить, что в момент t агент \mathfrak{A} произвел действие f_α .

Определим зависимость внутреннего состояния $\varphi_i(t)$ агента \mathfrak{A} от входных переменных $\mathbf{s}(t)$ как взвешенную сумму, тогда выражение (1) принимает вид:

$$\varphi(t) = \mathbf{W}\mathbf{s}(t), \quad (3)$$

где \mathbf{W} – матрица весов, компоненты которой могут принимать значения из некоторого ограниченного интервала $[-W_{\max}; W_{\max}]$. Для удобства в работе рассматриваются агенты, у которых число внутренних состояний φ_i равно числу возможных действий n , что позволяет определить (2) следующим образом:

$$f(t) = f_k, \quad k = \arg \max_i \varphi_i(t), \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (4)$$

Будем считать, что каждый агент \mathfrak{A} популяции \mathfrak{P} обладает *ресурсом* r . Изменение значения ресурса агента зависит от его действий:

$$\Delta r(t) = \sum_{i=1}^n k_i a_i, \quad \text{где } a_i = \begin{cases} 1, & \text{если } f(t) = f_i \\ 0, & \text{если } f(t) \neq f_i \end{cases}. \quad (5)$$

Коэффициент k_i имеет отрицательное значение, если действие приводит к уменьшению ресурса агента, и положительное в противном случае.

Для каждого момента времени t после вычисления действий и изменений значений ресурсов для всех агентов популяции \mathfrak{P} отбираются агенты, значение ресурса у которых меньше или равно нулю $r \leq 0$, эти агенты считаются погибшими и в дальнейшем не учитываются.

Для обеспечения воспроизводства популяции в репертуаре действий агента имеется действие «делиться» f_d . Если агент \mathcal{A}_p (родитель) совершает действие f_d , то в популяцию \mathfrak{P} добавляется новый агент \mathcal{A}_o (потомок). Матрица весов потомка \mathbf{W}^o формируется на основе матрицы весов родителя \mathbf{W}^p следующим образом:

$$W_{ij}^o = W_{ij}^p + m, \quad (6)$$

где m – случайная величина (своя для каждого веса), имеющая равномерное распределение на интервале $[-p_m; p_m]$. Выражение (6) задает мутационный процесс с амплитудой мутаций p_m . Будем называть матрицу \mathbf{W} – *генотипом* агента \mathcal{A} , отдельный элемент матрицы W_{ij} – *геном*. Стратегией поведения агента \mathcal{A} или его *фенотипом* будем называть отображение из пространства входных в пространство выходных переменных (действий), задаваемое (1) и (2).

Взаимодействие между агентами определяется топологией среды U . Основу U составляет ограниченное множество дискретных клеток, в которых могут находиться агенты \mathcal{A} . Топология U накладывает ограничения на возможные переходы агентов между клетками. Для того чтобы смоделировать эволюцию популяции на плоскости, в предложенной модели клетки среды были помещены в узлы двумерной прямоугольной сетки, натянутой на тор. Таким образом, за один такт времени агент мог переместиться в одну из четырех соседних клеток среды U .

Пусть популяция \mathfrak{P} агентов \mathcal{A} эволюционирует в клеточной среде, в клетках которой с некоторой вероятностью появляется ресурс, необходимый агентам для совершения действий. Для того чтобы агенты могли отличать родственников, каждому агенту \mathcal{A} сопоставлен вектор-маркер \mathbf{m} , задающий фенотипический признак агента. Значения компонент маркера агента потомка \mathcal{A}_o наследуются с мутациями от агента-родителя \mathcal{A}_p . Компоненты вектора \mathbf{m} могут принимать значения из некоторого интервала $[-M_{max}; M_{max}]$.

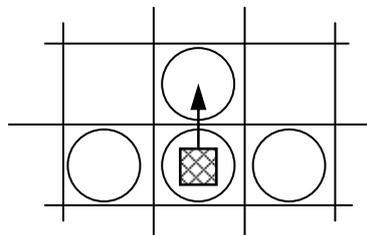


Рис. 1. Ориентация поля зрения относительно направления «вперед» агента (окружностями отмечены клетки, из которых агент может получать информацию, квадратом обозначен агент, стрелочкой – направление «вперед»).

Агент ориентирован в пространстве. Множество клеток, состояния которых определяют значения входных переменных некоторого агента,

будем называть *полем зрения* этого агента (рис. 1). Кроме информации о состоянии клеток в поле зрения вектор \mathbf{s} значений входных переменных содержит информацию о внутреннем ресурсе r , средней по отношению к себе родственности (фенотипической близости) агентов в клетке и родственности партнера по взаимодействию (возможной жертвы или хищника).

Значения выходной переменной f , определяющей действия агента и соответствующих коэффициентов k_i изменения внутреннего ресурса агента, использовавшиеся при моделировании, приведены в таблице 1.

Таблица 1

f	действие	изменение внутреннего ресурса r^*
f_0	отдыхать	$\Delta r = -k_0$
f_1	поворачиваться налево	$\Delta r = -k_1$
f_2	поворачиваться направо	$\Delta r = -k_2$
f_3	потреблять ресурс	$\Delta r = k_3$
f_4	двигаться на одну клетку вперед	$\Delta r = -k_4$
f_5	делиться	$\Delta r = -k_5$
f_6	отнять ресурс у соседа	$\Delta r = -k_6 + 2k_6$, если ресурс соседа $r_n \geq 2k_6$, $\Delta r = -k_6 + r_n$, в противном случае

*при моделировании коэффициенты k_i были заданы в соответствии со следующими равенствами: $k_2 = 2k_1$, $k_4 = k_5 = 2k_2$, $k_6 = 25k_4$, коэффициент k_3 являлся параметром в серии экспериментов.

Рассмотрим поведение трех вариантов модели: без возможности нападения агентов друг на друга и маркеров; с возможностью нападения, но без маркеров; с маркерами и возможностью нападения.

В каждом эксперименте начальная популяция \mathfrak{P} состояла из агентов \mathfrak{A} , которые имели одинаковые геномы $\mathbf{g}\{\mathbf{W};\mathbf{m}\}$. Геном агента начальной популяции был задан таким образом, что агент мог получать информацию, о наличии ресурса в текущей клетке, клетке по направлению «вперед», и совершать только три действия: потреблять ресурс, двигаться вперед и делиться. Для каждого из вариантов модели для различных значений эффективности потребления ресурса k_3 , производился расчет трех версий, отличавшихся начальным значением генератора случайных чисел, все остальные параметры были зафиксированы. В каждом эксперименте эволюция длилась $5 \cdot 10^7$ тактов, что значительно больше характерного времени перехода модели в стационарный режим с постоянной численностью популяции или в динамический режим с регулярными колебаниями численности.

На рисунке 2 представлены результаты компьютерных экспериментов. На графике отображены установившиеся значения численности популяции N_S^i для всех вариантов модели ($i = 1,2,3$) в зависимости от эффективности потребления ресурса k_3 .

Для первого варианта модели, в котором агенты не могут отнимать ресурс друг у друга, точки ложатся на прямую. Это значит, что макси-

мальная численность популяции растет прямо пропорционально эффективности потребления ресурса $N_S^1 = N_{Smax} \propto k_3$. Типичная динамика численности популяции для первого варианта модели приведена на рис. 3а.

Зависимость $N_S^2(k_3)$, полученная в экспериментах с вариантом модели, в котором агенты могут нападать друг на друга, но не могут отличать родственников, распадается на два участка (рис. 2). Для тех значений k_3 , для которых максимальная численность популяции меньше числа клеток в среде N_C ($N_C = 900$ во всех экспериментах) $N_{Smax}(k_3) \leq N_C$, т.е. одна клетка не способна «прокормить» одного агента, численность популяции $N_S^2(k_3) = N_{Smax}(k_3) = N_S^1(k_3)$. Для значений k_3 , для которых выполняется условие $N_{Smax}(k_3) > N_C$, численность популяции $N_S^2(k_3) = N_C$. Пример динамики численности популяции для последнего случая ($N_{Smax}(k_3) > N_C$) приведен на рис. 3б. Независимость установившейся численности N_S^2 от k_3 для $N_{Smax}(k_3) > N_C$ вызвана тем, что в популяции доминирует стратегия поведения в соответствии с которой, два агента, находящиеся в одной клетке, нападают друг на друга и продолжают бороться, пока один из них не погибнет.

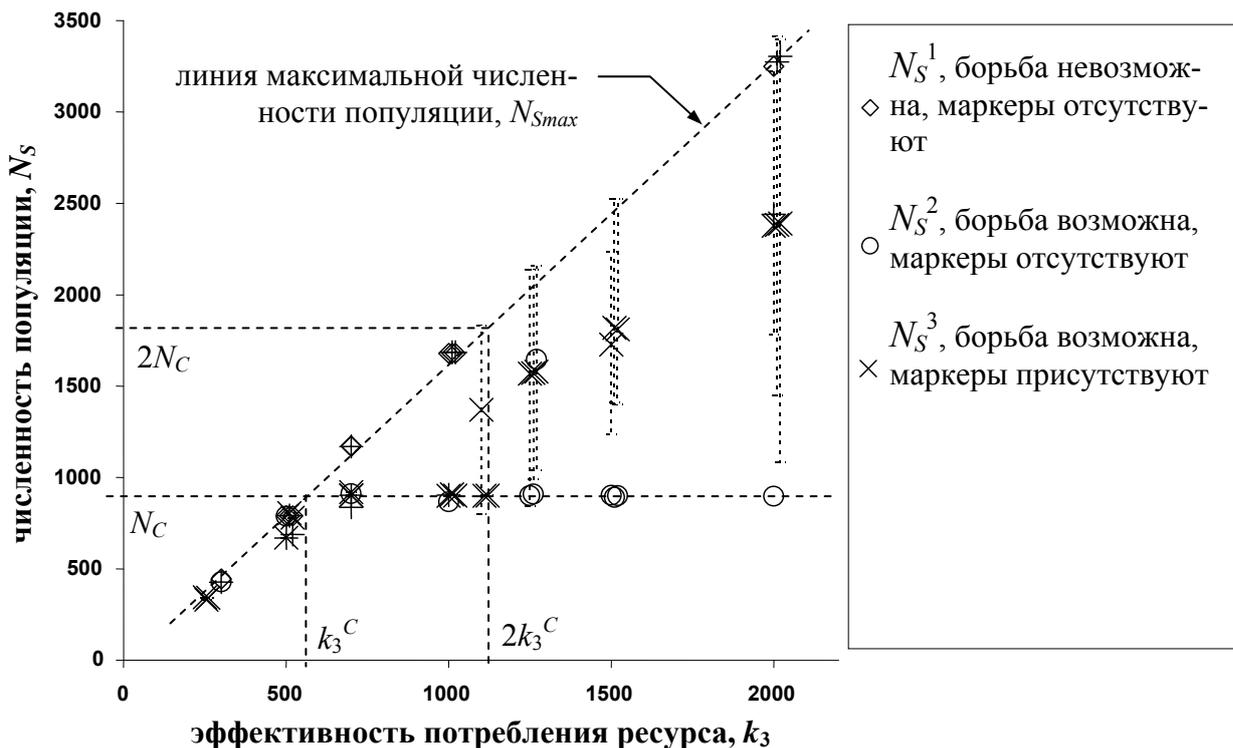


Рис. 2. Зависимость установившегося значения численности популяции N_S^i от эффективности потребления ресурса k_3 для различных вариантов модели ($i = 1,2,3$).

Поведение третьего варианта модели, в котором агенты могут отнимать друг у друга ресурс и имеют маркеры, позволяющие отличать родственников, при значениях k_3 , для которых выполняется условие $N_{Smax}(k_3) \leq 2N_C$, совпадает с поведением второго варианта модели $N_S^3(k_3) = N_S^2(k_3)$. При значениях k_3 , для которых $N_{Smax}(k_3) \geq 2N_C$ числен-

ность популяции постоянно колеблется. Типичное поведение численности популяции во времени для этого случая приведено на рисунке 3в. Кроме того, при увеличении k_3 , максимальная амплитуда колебаний численности растет (на рисунке 2 интервалы колебаний численности для точек N_S^3 показаны вертикальными пунктирными линиями). Причины, вызывающие колебания, будут рассмотрены ниже.

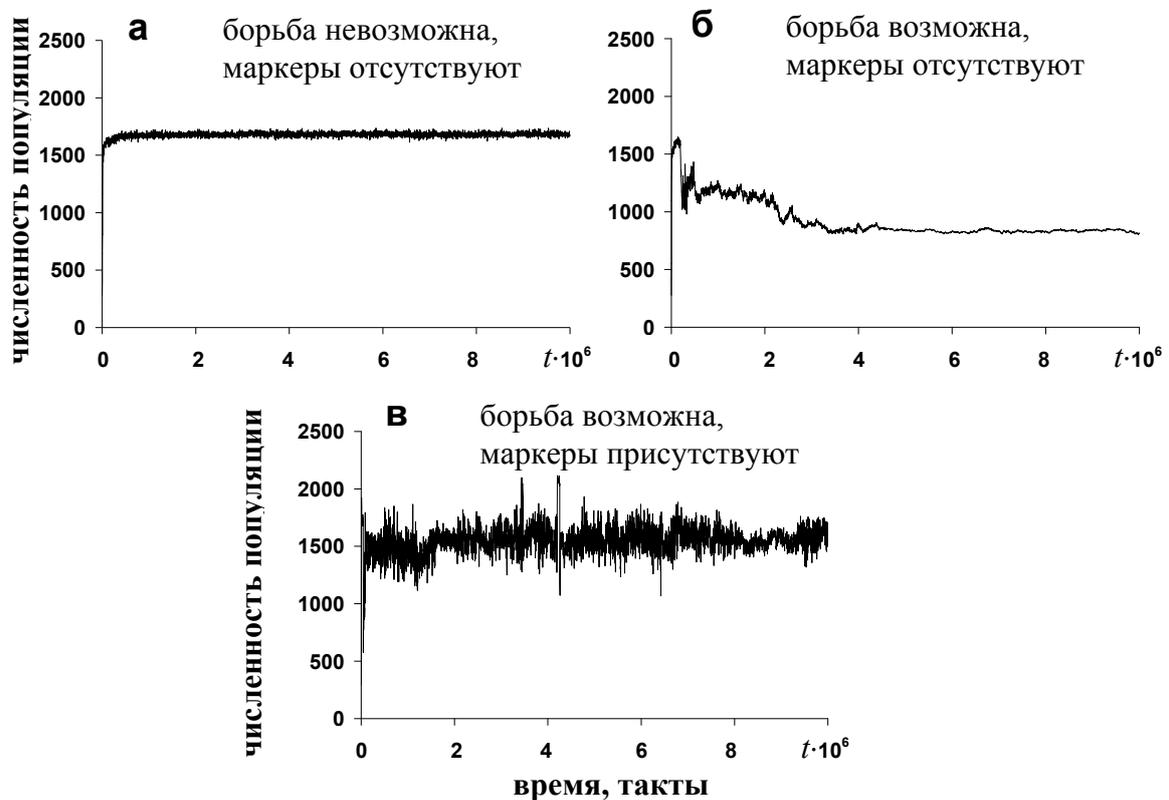


Рис.3. Динамика численности популяции для различных вариантов модели (см. текст). Для случаев а), б) эффективность потребления ресурса $k_3 = 1000$, для случая в) $k_3 = 1250$.

Для того чтобы понять, как родственный отбор влияет на эволюцию в модели, рассмотрим подробнее поведение третьего варианта модели значение эффективности потребления ресурса k_3 для которого, удовлетворяет условию $N_{Smax}(k_3) > 2N_C$. Динамика численности популяции для этого эксперимента приведена на рисунке 3в.

Для того чтобы определить, как различие между маркерами агентов влияет на их поведение, будем рассматривать действия агентов только в тех ситуациях, когда в клетке находятся два агента, которые могут быть родственниками (малое значение расстояния между маркерами \mathbf{m}) или чужаками (большое значение расстояния между маркерами \mathbf{m}). Кроме того, проследим, как будет меняться поведение агентов в этих ситуациях для разных значений накопленного ресурса r .

Для того чтобы облегчить анализ поведения модели выделим несколько крупных классов стратегий. При использовании теории игр для

моделирования взаимодействия животных принято давать названия стратегиям поведения. Так, например, агенты, всегда проявляющие агрессивность в отношении партнера, называются «ястребы», а всегда избегающие конфликта – «голуби». Кроме ястребиных и голубиных стратегий в исследуемой модели присутствует стратегия «буржуа». Эта стратегия заключается в том, что агент не посягает на «собственность» других агентов, т.е. остается в своей клетке, но защищает «свой» ресурс, нападая на любого, пришедшего на его территорию.

Анализ результатов вычислительных экспериментов с моделью позволяет открыть пару новых стратегий² неизвестных в эволюционной теории игра. В одну из них попадают агенты, избегающие конкуренции за ресурс с родственниками (малое расстояние между маркерами) и нападающие на чужаков. В соответствии с поговоркой: «Ворон ворону глаз не выклюет», будем называть эту стратегию стратегией «ворона». Вторая стратегия – стратегия кооперативной обороны. Следующие этой стратегии агенты, остаются в одной клетке с родственниками до тех пор, пока им хватает ресурса, и нападают на всех чужаков попадающих в клетку. Успешность такой стратегии связана с тем, что каждый агент в отдельности может владеть ресурсом $r \leq r_{max}$, а, находясь в одной клетке, родственники в сумме могут накопить ресурс больший r_{max} , и, следовательно, при борьбе чужака с несколькими родственниками, вероятность выживания одного из родственников будет выше вероятности выживания чужака. В природе у многих малых стайных птиц, например у скворцов, наблюдается кооперативная защита от хищника. Если провести аналогию с коллективной защитой в модели, то можно назвать агентов, придерживающихся подобной стратегии – «скворцами».

Рассмотрим, как изменение эффективности потребления ресурса k_3 влияет на эволюцию кооперации в третьем варианте модели. При низком уровне эффективности потребления ресурса $k_3 < k_3^C$ (см. рис. 2) ресурса, появляющегося в одной клетке, недостаточно для выживания одного агента, поэтому агенты вынуждены постоянно перемещаться в пространстве. Постоянное движение агентов приводит к тому, что конкуренция за ресурс между родственниками отсутствует, а, следовательно, отсутствует и вызываемое ей давление отбора. Но если агенты могут нападать друг на друга, то присутствует родственный отбор в сторону не нападения на родственников. Поэтому при $k_3 < k_3^C$ в популяции частота агентов, способных дифференцировать свое поведение в отношении родственников, растет вместе с частотой агрессивных агентов (см. рис. 4).

Когда одна клетка способна «прокормить» одного агента, но не двух, т.е. $k_3^C < k_3 < 2k_3^C$, отдельный агент имеет тем большую вероятность выжить в данный момент времени, чем выше его внутренний ресурс, так как

² Названия стратегий предложены Петром Валентиновичем Турчиным.

от величины накопленного ресурса зависит успешность борьбы. Это приводит к тому, что отбор действует в сторону повышения внутреннего ресурса, и отражается в приближении максимума распределения агентов по накопленной энергии к максимально возможным значениям. Так как все агенты обладают примерно одинаковым внутренним ресурсом, а значит и одинаковыми шансами на выживание в поединке, то в популяции устанавливается «баланс сил» – доминирующей стратегией является стратегия буржуа. При этом в популяции присутствуют, как агенты, не различающие родственников, так и вороны. В модели при делении агента энергия распределяется поровну между родителем и потомком, что делает каждого из них неконкурентоспособным в сравнении с агентами из соседних клеток. Следовательно, если один из агентов после деления покидает клетку, он с большой вероятностью погибает. С другой стороны, если они оба остаются в клетке, то даже в случае ненападения друг на друга один из них погибает от недостатка ресурса (т.к. $k_3 < 2k_3^C$). Отсюда можно сделать вывод, что для $k_3^C < k_3 < 2k_3^C$ отбор в сторону родственной кооперации будет слабее, чем для $k_3 < k_3^C$, но при этом он все равно будет достаточно сильно действовать на популяцию. Результаты моделирования свидетельствуют в пользу этого предположения. На рисунке 4 видно, что в отличие от первого интервала $k_3 < k_3^C$, на котором численность различающих родственников агентов следует за численностью агрессивных агентов (т.е. практически все они вороны), на втором интервале $k_3^C < k_3 < 2k_3^C$ наблюдается сильный разброс значений частоты родственных агентов от эксперимента к эксперименту.

При $k_3 > 2k_3^C$ на эволюцию в популяции влияет несколько разнонаправленных факторов. За счет возможности кооперативной обороны скворцов, равновесие с высокой средней внутренней энергией по популяции, обычное для $k_3^C < k_3 < 2k_3^C$, становится неустойчивым. Наличие скворцов создает отбор в сторону понижения энергии агента, такое понижение происходит за счет появления стратегий со все большей скоростью размножения. При этом если средний внутренний ресурс для агентов некоторой стратегии опускается ниже величины $r_s < k_6$, нападение на агентов этой стратегии становится не выгодно, так как в соответствии с определением взаимодействия между хищником и жертвой (см. таблицу 1), изменение ресурса хищника в этой ситуации становится отрицательным. Это делает возможным существование в популяции значительной доли голубей. С другой стороны, конкуренция между голубями действует, как фактор отбора в сторону увеличения внутреннего ресурса, т.к. агент, имеющий большой запас энергии, имеет большее время на поиск ресурса. Все эти факторы приводят к сложной коэволюции стратегий голубей, воронов и скворцов. Высокая конкуренция как внутри, так и между стратегиями ведет к отбору кооперирующихся агентов. Результаты экспериментов пока-

зывают, что доля кооперирующихся агентов высока для всех реализаций (рис. 4).



Рис. 4. Значения усредненной частоты агрессивных (кружки) и различающих родственников (треугольники) агентов в популяции для различных значений эффективности потребления ресурса k_3 . Частоты усреднялись по времени за период пребывания популяции в установившемся режиме. Линии проведены через средние значения. Агрессивными считались агенты, которые умели совершать действие «нападать». Считалось, что агент отличает родственников, если его действия в отношении родственника отличались от действий в отношении не родственника.

Таким образом, приведенный анализ результатов компьютерных экспериментов показывает, что модели типа искусственной жизни позволяют исследовать не только, как одна эволюционная стратегия сменяет другую, но и сами механизмы возникновения стратегий. В отличие от существующих на сегодня моделей эволюции поведения, и в частности кооперации, агенты в исследуемой модели не были снабжены фиксированным набором из небольшого числа стратегий. Напротив, исходя из элементарных предположений, каждый агент имел набор входных (сенсоры) и выходных (действия) переменных. При таком подходе, изменение стратегий поведения осуществляется в процессе эволюции функции связывающей входные и выходные переменные, что позволяет получить гораздо более обширный репертуар стратегий.

ИСКУССТВЕННАЯ ЖИЗНЬ ВСТРЕЧАЕТСЯ С НАСТОЯЩЕЙ ЖИЗНЬЮ

Чтобы проверить адекватность полученных результатов подвергнем их проверке на соответствие реальным эволюционным процессам. Для этого будем интерпретировать изложенную выше модель, как модель эволю-

ции социальной динамики в примитивных обществах охотников-собирателей и ранних земледельцев.

Адекватность представления моделью исследуемого явления определяется правильным соотношением различных ее составляющих с объектами и процессами в реальной среде. Будем считать, что агенту из модели, изложенной в предыдущей главе, будет соответствовать община охотников-собирателей или ранних земледельцев. Такая община, обычно состоящая из нескольких простых семей или одной расширенной семьи (семья с близкими родственниками), в первобытном обществе выступает в качестве отдельной автономной единицы [10]. Члены общины селятся вместе, при перемещении с места на место и при взаимодействии с членами других общин община выступает в качестве целостного субъекта.

Людскому ресурсу, т.е. численности общины, будем сопоставлять значение внутреннего ресурса агента модели. Это позволяет учесть в модели многие важные характеристики первобытных общин. Так численность общины тем выше, чем больше она получает ресурсов из окружающей среды, но при этом она ограничена. В модели в процессе борьбы часть ресурса атакуемого агента переходит нападающему, это соответствует захвату пленных. Захват пленных при нападении являлся обычной практикой в первобытных обществах. В основном в плен брали женщин и детей, которые затем включались в общину победителей. Реже в плен брали мужчин, которых использовали в качестве рабов [11,12].

В архаичных сообществах родовые отношения играют очень важную роль [13]. Поэтому введение в модель наследуемых маркеров, позволяющих агенту оценить степень родства партнера по взаимодействию, является одним из основных допущений модели. Следует отметить, что родство в модели не обязательно соответствует родственным отношениям между конкретными семьями, так как первобытные общины состояли из представителей различных родов. Поэтому маркер агента можно рассматривать, как совокупность нескольких характеристик общины, игравших важную роль при выделении «родственных» общин от «чужих» в первобытном обществе. В качестве таких характеристик можно рассматривать принадлежность к роду, племени, определенной языковой группе.

При моделировании в качестве параметра, изменяющегося в серии экспериментов, выступала эффективность потребления ресурса, локализованного в клетке, одним агентом. Будем считать этот параметр аналогом количества ресурса (калорий), который может собрать община в окрестности стоянки, не перемещая ее. Таким образом, для реальных общин этот параметр будет определяться двумя факторами – экологическими условиями, которые зависят от географического положения и климата, и эффективностью извлечения ресурсов из среды, т.е. технологией. При моделировании интервал изменения эффективности потребления ресурса был порядка этой величины ($k_3 \in [250,2000]$), при этом в начале этого интервала

ла эффективность не достаточна для выживания одного агента (в одной клетке), а в конце достаточна для выживания нескольких агентов. Тогда охотники-собиратели, существующие в неблагоприятных экологических условиях, например в полупустыне, расположатся в начале интервала, а ранние земледельцы и охотники-собиратели, существующие в благоприятных условиях в конце.

Таким образом, мы видим, что модель достаточно полно описывает основные характеристики первобытнообщинной системы.

Одними из основных характеристик примитивных обществ является уровень агрессии. Антропологией и этнографией накоплен достаточно богатый материал об агрессивности в архаичных сообществах [11,12,14-17], что позволяет наиболее полно сопоставить результаты моделирования с реальными социальными системами именно в этом контексте. Для тестирования модели использовалась информация о примитивных обществах почерпнутая из этнографических и антропологических источников, а также из стандартной кросс-культурной выборки³ [18].

Для оценки уровня агрессивности в исследуемой модели использовались две характеристики:

1. Частота в популяции агрессивных агентов. Эта величина отражает количество агентов потенциально готовых совершать агрессивные действия.
2. Частота совершения действия f_6 («отнять ресурс у соседа»). Дает оценку количества совершаемых агрессивных действий в популяции.

Зависимость этих характеристик от величины ресурсной базы (параметр k_3) приведены на рисунках 4 и 5а соответственно. Эти зависимости демонстрируют, что поведение модели четко различается в трех интервалах: $k_3 < k_3^C$ – скудная ресурсная база; $k_3^C < k_3 < 2k_3^C$ – удовлетворительная ресурсная база; $k_3 > 2k_3^C$ – хорошая ресурсная база.

Отталкиваясь от результатов моделирования, можно сделать следующие предсказания о зависимости агрессивности в примитивных сообществах от экологических условий:

1. В условиях скудной ресурсной базы агрессивность агентов и количество совершаемых агрессивных актов увеличиваются по мере улучшения экологических условий.
2. При удовлетворительном обеспечении ресурсами частота агрессивных агентов в популяции максимальна, а количество агрес-

³ Стандартная кросс-культурная выборка (standard cross-cultural sample) [19] – 186 обществ, специально отобранных для того, чтобы выборка, как можно более репрезентативно представляла весь спектр региональных, культурных и развитийных различий между социальными системами. Информация об обществах из выборки регулярно пополняется. Обновленные версии выборки представляются журналом World Cultures.

сивных действий близко к нулю. При этом обе характеристики не зависят от количества ресурсов.

3. При хорошей ресурсной базе по мере ее увеличения, как частота агрессивных агентов, так и количество агрессивных действий растут.

Согласно представлениям современной антропологии, подкрепленным богатым этнографическим материалом, улучшение ресурсной базы в большинстве случаев должно вести к повышению агрессивности в архаических обществах [14-16]. Результаты моделирования находятся в соответствии с этой гипотезой в условиях скудной и хорошей ресурсной обеспеченности, но при промежуточных значениях параметра k_3 модель обладает «аномальным» поведением. На первый взгляд это противоречит фактам. Однако, существуют случаи, когда улучшение экологических условий приводит к снижению наблюдаемого исследователями уровня насилия. Так, четыре группы бушменов Калахари – !ко, г/ви, нхаро и !кунг обитают в условиях различной обеспеченности ресурсами [16]. Наиболее обеспечены ресурсами !кунг, а наименее !ко, остальные группы имеют промежуточную обеспеченность. При этом наибольший уровень межобщинной конфликтности среди четырех наблюдается у !ко, а наименьший у !кунг.

Это исключение из общего правила позволяет нам протестировать предсказания модели. Данные об обеспеченности ресурсами, приведенные в [16], позволяют предположить, что !ко могут быть сопоставлены с популяцией агентов в условиях скудных ресурсов, а !кунг с популяцией в условиях удовлетворительных ресурсов. Результаты моделирования показывают, что в первом случае количество совершаемых агрессивных действий больше, чем во втором (рис. 5а), что совпадает с этнографическими наблюдениями. При этом модель позволяет сделать еще один прогноз, который может быть проверен. Это прогноз заключается в том, что, несмотря на низкий уровень межобщинной агрессии при удовлетворительной ресурсной базе, агенты обладают развитыми возможностями совершения агрессивных действий (рис. 4). Оказывается, что это действительно имеет место у !кунг. Охотники !кунг всегда носят с собой отравленные стрелы, убить человека при помощи которых для охотника не представляет особого труда. Более того, существуют нормы, оправдывающие убийство посягнувшего на чужую собственность (улей с медом) [15]. Предсказание модели подтверждается и наблюдениями аборигенов западной пустыни Австралии, которые живут в экологических условиях, аналогичных условиям !кунг, и также демонстрируют низкий уровень агрессии. При этом у аборигенов присутствует социализация на агрессию, проявляющаяся в виде создания отрядов тайных мстителей и ритуальных поединков [15].

Таким образом, результаты моделирования для первых двух интервалов обеспеченности ресурсом находятся в согласии с данными наблюдений. Для того чтобы оценить адекватность модели при хорошей ресурсной

базе, сравним ее с имеющимися представлениями об агрессивности у ранних догосударственных земледельцев.

Наиболее распространенная гипотеза о природе агрессивности у доиндустриальных обществ, основывается на мальтузианском предположении, заключающемся в том, что причиной повышения агрессии в обществе является рост плотности населения [20]. Следовательно, высокий уровень межобщинной агрессии должен положительно коррелировать с плотностью населения.

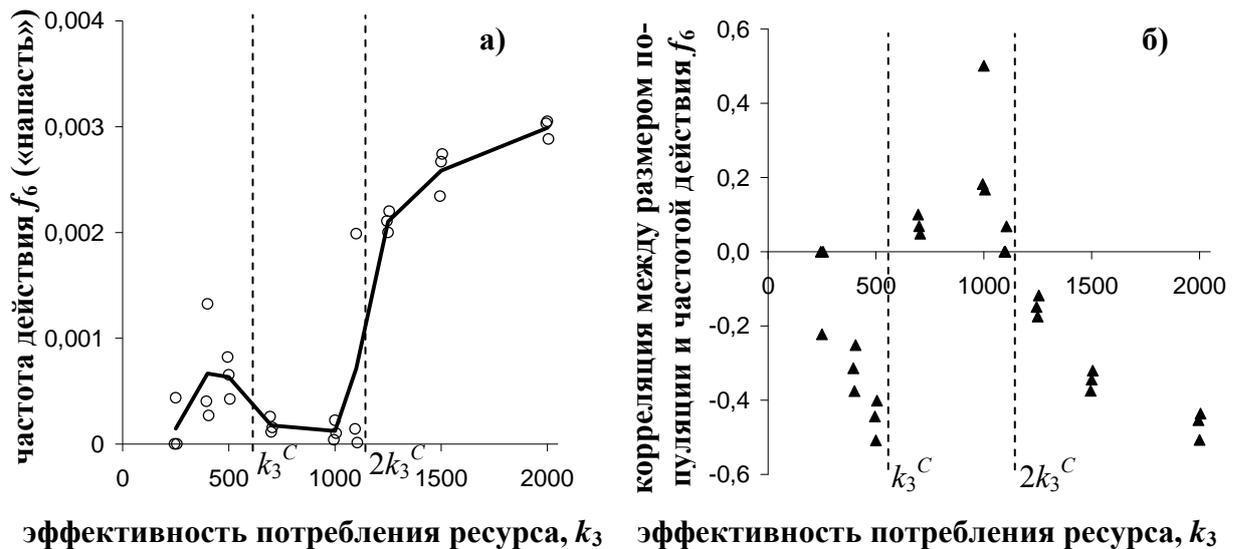


Рис. 5. Зависимость средней частоты действия f_6 («отнять ресурс у соседа») в популяции (а) (частота усреднялась по времени за период пребывания популяции в установившемся режиме, линия проведена через средние значения) и корреляционным коэффициентом между размером популяции и частотой f_6 (все корреляции значимые $p < 0,01$) (б) от эффективности потребления ресурса k_3 .

Расчет рассматриваемой корреляции для представленной в работе модели приведен на рисунке 5б. Результаты моделирования предсказывают наличие достаточно значительной отрицательной корреляции.

Для того чтобы протестировать предсказание модели посмотрим, как плотность популяции коррелирует с частотой конфликтов для примитивных обществ из стандартной кросс-культурной выборки [18]. Высокие значения эффективности потребления ресурса в модели соответствуют раннеземледельческим обществам, использовавшим экстенсивное земледелие, поэтому для анализа из выборки были отобраны только общества с данным типом хозяйства. Результаты расчета корреляционных коэффициентов показывают, что корреляция между плотностью населения и переменными, характеризующими уровень внутренней агрессии, отрицательная и достаточно высокая. При этом корреляция значима только для одной из переменных – «Частота вооруженных конфликтов между общинами» ($r = -0,489$, $p = 0,046$). Качественно схожие результаты расчета аналогичной корреляции получены в работе [20].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Искусственная жизнь относительно молодое направление в компьютерном моделировании, которое изначально возникло, как набор инструментов для исследования сложных систем и процессов самоорганизации. Метод искусственной жизни позволяет строить модели, обладающие интересным поведением, отталкиваясь от простых и ясных допущений. В представленной работе такими допущениями были: размножение агентов, сопровождаемое наследованием поведения с мутациями; возможность передвижения в пространстве и нападения агентов друг на друга; способность агентов накапливать ограниченный запас ресурса, расходуемого на действия; возможность распознавать родственность агента при взаимодействии. Это позволило исследовать не только изменение частот фиксированных стратегий поведения в популяции, но и сам процесс их возникновения, механизмы их самоорганизации. В отличие от большинства современных моделей эволюции кооперативного поведения, стратегии не были заданы заранее, а были сформированы эволюцией из небольшого репертуара элементарных действий. При этом, среди стратегий, возникших в модели в отсутствие родственных маркеров, не составляет труда найти аналоги таких стратегий, как голубь, ястреб и буржуа, которые были введены ранее другими исследователями и активно используются во многих моделях в данной области. Добавление в модель маркеров привело не только к прогнозируемой модификации имеющихся стратегий – появлению кооперирующихся голубей и ястребов (воронов), но и к формированию новой стратегии скворцов, заключающейся в коллективной обороне родственников.

Кроме очевидного приложения модели в теории кооперации, полученные результаты позволяют рассматривать ее в качестве модели социальной эволюции в архаических обществах охотников-собирателей и примитивных земледельцев. Проверка предсказаний, следующих из результатов моделирования, на этнографических данных показала их адекватность. Это демонстрирует, что модели искусственной жизни не просто теоретические игрушки, а игрушки, которые могут быть с пользой использованы при исследовании окружающих нас сложных систем.

В заключении я хотел бы поблагодарить В.Г. Редько, П.В. Турчина за их внимание к данной работе и ее поддержку, а также сказать спасибо Г.Г. Малинецкому и Ю.Б. Котову за полезные замечания и обсуждение результатов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Нейман Дж.* Теория самовоспроизводящихся автоматов. – М.: Мир, 1971.
2. *Цетлин М.Л.* Исследования по теории автоматов и моделированию биологических систем. – М.: Наука, 1969.

3. Кулагина О.С., Лянунов А.А. К вопросу о моделировании эволюционного процесса // сб. «Проблемы кибернетики», вып. 16. М.: Наука, 1966.
4. Evolution, Games and Learning: Models for Adaptation in Machines and Nature // *Physica D* 22D(1-3), 1986.
5. Новое в синергетике. Взгляд в третье тысячелетие. Сборник статей под ред. Г.Г.Малинецкого, С.П.Курдюмова. – М.: Наука, 2002.
6. Куракин П.В., Малинецкий Г.Г. На пороге «субъективной» синергетики (синергетика II). Синергетика. Труды семинара. Т.3, С.242-250. М.: изд-во МГУ, 2000.
7. Редько В.Г. Эволюционная кибернетика. – М.: Наука, 2001.
8. Holland J.H. Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence. Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1992.
9. Hamilton W.D. The evolution of altruistic behavior // *Am. Nat.* V.97. p.354-356, 1963.
10. Кабо В. Первобытная доземледельческая община. – М.: Наука, 1986
11. Otterbein K.F. Killing of Captured Enemies: A Cross-cultural Study // *Current Anthropology* V.44, N3, p.439-443, 2000.
12. Шнирельман В.А. У истоков войны и мира. Война и мир в ранней истории человечества, т.1. – М.: ИЭА, 1994.
13. Pasternak B., Ember C.R. and Ember E. Sex, Gender, and Kinship: A Cross-Cultural Perspective. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1997.
14. Dyson-Hudson R., Smith E.A. Human territoriality: An Ecological Reassessment // *American Anthropologist* V.10, p.21-41, 1978.
15. Казанков А.А. Агрессия в архаических обществах. – М.: Иаф РАН, 2002.
16. Cashdan E. Territoriality among Human Foragers: Ecological Models and an Application to Four Bushman Groups // *Current Anthropology* V.24, N1, p.47-55, 1983.
17. Ember C.R., Ember M. War, Socialization and Interpersonal Violence: A Cross-Cultural Study // *The Journal of Conflict Resolution* V.38, N4, p.620-646, 1994.
18. Standard Cross-Cultural Sample Variables (Edited by William T. Divale, Daria Khaltourina and Andrey Korotayev) // *World Cultures* V.13, 2002.
19. Murdock G.P., White D.R. Standard Cross-Cultural Sample // *Ethnology* V.8, p.329-69, 1969.
20. Nolan P.D. Toward an Ecological-Evolutionary Theory of the Incidence of Warfare in Preindustrial Societies // *Sociological Theory* V.21, N1, p.18-30, 2003.
21. Turchin P., Korotayev A. Population Dynamics and Internal Warfare: a Reconsideration // *American Anthropologist* (в печати).