

РОЕВАЯ РАЦИОНАЛЬНОСТЬ И ИСКУССТВЕННЫЕ СЕТИ ФИЛАМЕНТОВ АКТИНА

А. Н. ШУМАН¹⁾

¹⁾ Университет информационных технологий и управления, ул. Сухарского, 2, 35-225, г. Жешув, Польша

Рассматривается искусственная сеть филаментов актина как среда вычисления с позиции информатики. Эта сеть является самым важным элементом в удержании формы клетки и обеспечении ее подвижности. Показано, что сеть филаментов актина ответственна за все изменения формы клетки, например за деление одной клетки в две дочерние, за деформации клетки посредством растущих псевдоподий во время питания. Указывается на то, что филаменты актина собираются и демонтируются с течением времени, и, как следствие, мы сталкиваемся с постоянной сборкой и разборкой сетей филаментов актина. Алгоритмы данной сети реализуются в роевом поведении, примерами которого являются: рой насекомых, стая птиц, табун лошадей, косяк рыб. Отмечается, что с позиции бихевиоризма данное поведение считать социальным можно, однако с позиции символического интеракционизма – нельзя. Представлены примеры роевого (несоциального коллективного) поведения среди людей.

Ключевые слова: роевая рациональность; филаменты актина; роевое поведение; социальное поведение.

SWARM INTELLIGENCE AND ARTIFICIAL NETWORKS OF ACTIN FILAMENTS

A. N. SCHUMANN^a

^a University of Information Technology and Management, Suharskaga Street, 2, 35-225, Rzeszow, Poland

In the paper we consider an artificial network of actin filaments as a computational medium from the point of view of computer science. This network is a main factor in keeping the cell shape and in the cell motility. The matter is that the actin filament network is responsible for the cell deformation, e. g. for the cell division into two cells, for growing pseudopodia for feeding. Meanwhile, actin filaments assemble and disassemble in course of time. As a consequence, we face the permanent appearing and disappearing filaments. This network possesses algorithms which are realizable in any swarm behaviour. Its examples are as follows: insect swarm, bird flock, horse herd, fish school. From the standpoint of behaviourism, this behaviour is social. However, from the standpoint of symbolic interactionism, it is not. In the paper there are given examples of swarm (non-social collective) behaviour of human beings.

Key words: swarm intelligence; actin filaments; swarm behaviour; social behaviour.

Поведение клетки достаточно разумно. Она постоянно обменивается информацией со средой: получает извне сигналы, чаще механические или химические, и реагирует на них изменением своей структуры или перемещениями. Особенно хорошо видны реакции клетки на внешние сигналы на примере одноклеточных организмов, таких как

амеба (*Amoeba proteus*). Этот организм в зависимости от появления новых стимулов постоянно меняет форму или локализацию.

Актин – это белок, который отвечает за реакции клетки на внешние раздражители. При некоторых условиях он образует филаменты – небольшие нити, которым свойственна поляризация.

Образец цитирования:

Шуман А. Н. Роевая рациональность и искусственные сети филаментов актина // Журн. Белорус. гос. ун-та. Социология. 2017. № 2. С. 59–64.

For citation:

Schumann A. N. Swarm intelligence and artificial networks of actin filaments. *J. Belarus. State Univ. Sociol.* 2017. No. 2. P. 59–64 (in Russ.).

Автор:

Андрей Николаевич Шуман – кандидат философских наук, доцент; заведующий кафедрой когнитивистики.

Author:

Andrew Schumann, PhD (philosophy), docent; head of the department of cognitive science.
andrei.shumann@gmail.com

Последние, в свою очередь, могут сплетаться в деревья или образовывать решетку.

В случае появления сигнала происходит полимеризация актинов в филаменты и образование сетей актиновых филаментов. Например, амeba сталкивается с аттрактантом (феромонами, которые сигнализируют о еде). В этот момент начинают синтезироваться сети филаментов актина, которые вытягивают мембрану амебы так, чтобы образовались псевдоподии (щупальца). Они окружают предполагаемый участок с едой и захватывают пищу. Механизм этого перемещения сводится к реакциям актина. При наличии химического сигнала для амебы, который исходит от еды, актин собирается в сети филаментов, чтобы создать у стенок мембраны напряжение, достаточное для того, чтобы мембрану вытянуть в щупальце.

Образованием сетей филаментов на нужных участках актин помогает клетке реагировать на внешние раздражители. Сети филаментов отвечают за защиту мембраны от механических повреждений. Фактически сети филаментов актина служат мобильным скелетом клетки.

В своем исследовании мы попытаемся разработать динамическую сеть – *искусственную сеть филаментов* (ИСФ) [1] – по аналогии с искусственной нейронной сетью. Для этого необходимо выявить класс вычислительных задач для ИСФ, таких как обработка информации, управление процессами больших данных, навигация, распознавание образов и т. д. ИСФ может найти в последующем огромное число различных коммерческих приложений. Дело в том, что ИСФ – это сильное обобщение искусственных нейронных сетей и может использоваться более эффективно, чем последние. Предлагаем представить ИСФ как новую теорию игр, которая может быть применена в формализации судебных процессов в рамках электронного правосудия.

В ходе проекта *PhyChip*¹ мы разработали схему, которая может программировать поведение плазмодиев [2]. Расширим ее до общей теории ИСФ как теории массивно-параллельного поведения появляющихся и исчезающих агентов с постоянным изменением топологии их связей.

В основе инновационной идеи ИСФ лежит программирование структуры больших данных и представление их как процесса вычисления. Филаменты актина станут биовдохновленной моделью больших данных. Предварительные результаты можно охарактеризовать как новую теорию игр, способную моделировать системы связей между миллионами подвижных агентов. Эти результаты могут использоваться не только в электронном правосудии, но и в анализе рынков, интеллектуальном анализе и т. д.

В ходе проекта *PhyChip* мы выяснили, что в поведении плазмодия действуют те же алгоритмы стимулирования поведения через репелленты и аттрактанты, что и у любого роя. Например, *prokaryote*, одноклеточный организм с отсутствием четкой мембраны для ядра (*karyon*), может создавать колонии в форме плазмодия. Эти колонии называются биофильмами [3]. Клетки в биофильмах организованы в динамические сети и могут передавать сигналы (так называемое считывание кворума). Данные бактерии считаются социальными. Социальные насекомые могут быть проиллюстрированы на примере муравьев – насекомых семьи *Formicidae*. Они способны к разделению труда: строят полноценное общество своего гнезда даже с возможностью делать муравьев иных колоний рабами [4]. Кроме того, *Synalpheus regalis sp.*, разновидность креветок, которые обычно живут в коралловых рифах, демонстрируют коллективное поведение наподобие поведения муравьев [5]. Среди креветок той же колонии есть размножающаяся самка и рабочие креветки. Подобное муравьям устройство колонии наблюдается и среди некоторых млекопитающих, например среди голых землекопов (*Heterocephalus glaber sp.*) [6]. В каждой колонии есть только одна королева и от одного до трех самцов для воспроизводства, в то время как другие члены колонии – только рабочие. Такое же коллективное поведение типично для дамарских пескороев (*Fukomys damarensis sp.*), другой разновидности млекопитающего: у них тоже есть одна королева и много рабочих [7].

Все эти типы поведения роя можно моделировать поведением плазмодия, изученным нами. Иными словами, это поведение формализуемо как ИСФ.

Группа людей, например пешеходов, также может следовать поведению роя, такому как табуны лошадей или косяк рыб: пешеходы предпочитают избегать человека, условно назначенного ими в качестве потенциального хищника; если существенная часть группы (не менее чем 5 %) меняет направление, то остальные следуют в этом новом направлении (например, следуют за не менее чем 5 % пешеходов, идущими на красный сигнал светофора) [8]. Основываясь на муравьином алгоритме, можно объяснить регистрацию пассажиров на авиарейсы [9]. При условии панического бегства большая часть людей реализует поведение роя [7]. Известно, что любым роем можно управлять, размещая в нужных местах раздражители: аттрактанты и репелленты. Это было выявлено нами в ходе проекта *PhyChip*, т. е. мы можем даже проектировать логические цепи, основанные на топологии раздражителей [10–12].

¹Подробнее см.: www.phychip.eu.

Данная модель интеллекта, воплощенная в любом роде, зависит от сетей филаментов актина. Дело в том, что на уровне филаментов актина мы имеем дело с главными механизмами роевого интеллекта в оптимизации перемещений [13–15]:

- боковой активацией (lateral activation, LA), являющейся структурированием сети, при которой определенные единицы активизировали своих соседей для увеличения их собственной реакции;
- боковым торможением (lateral inhibition, LI), являющимся структурированием сети, при котором определенные единицы запрещали своим соседям возбуждаться.

Таким образом, модель сетей филаментов актина становится фундаментальной для всех роев: от бактерий до людей, потому что LA и LI в реакциях на побудители протекают на подклеточном уровне филаментов актина (и именно LA и LI отвечают за оптимизацию логистики).

В судебных процессах также имеют место LA и LI. Так, в модели предпочтения в гражданских делах, которую условно можно назвать компромиссной, действует LA, а в модели предпочтения в уголовных делах, которую условно можно назвать бескомпромиссной, действует LI. Дело в том, что в гражданских делах объекты предпочтения равномерно рассредоточены, поэтому возможны компромиссы. А вот в уголовных делах объекты предпочтения сконцентрированы и компромисса быть не может.

В машинном обучении используются некоторые биологически инспирированные сети – искусственные нейронные сети, имеющие фиксированный набор процессоров, которые вовлечены в вычисления. Однако элементарные вычислительные единицы, понимаемые как процессоры, в реальных биологических или социальных сетях никогда не зафиксированы. Они постепенно собираются и разбираются в реакциях на различные напряжения и выступают внешними условиями. Один из лучших примеров таких единиц в биологических сетях представлен сетями филаментов актина. Их сети являются самыми важными элементами в удержании формы клетки и обеспечении ее подвижности. Дело в том, что сети филаментов актина ответственны за изменения формы клетки, например за деление одной клетки в две дочерние, деформацию клетки посредством растущих псевдоподий во время питания. Филаменты актина собираются и демонтируются с течением времени. Как следствие, мы сталкиваемся с постоянной сборкой и разборкой сетей филаментов актина.

Подвижность плазмодия *Physarum polycephalum*, которая вполне разумна и может быть запрограммирована при использовании хемотаксиса для проектирования компьютеров на их средах, основана на сетях филаментов актина. Эти сети являются универсальным механизмом при при-

еме и дальнейшей передаче внешних побудителей/напряжений в любом биологическом организме. Химическими веществами можно управлять путем полимеризации и деполимеризации актина, т. е. сборки и разборки их филаментов. Например, с одной стороны, *cytochalasin B* строго запрещает формирование сетей филаментов актина; с другой стороны, *muscotoxin* *Mухомора phalloides* строго активизирует скопление всего G-актина клетки в филаменты, которые становятся Ph-актином и не могут более деполимеризоваться, и таким образом этот токсин устраняет любую динамику цитоскелета. Следовательно, теоретически мы можем предположить, что синтезировать и затем управлять/программировать ИСФ вполне возможно. Эта сеть фундаментальна при любой реакции клетки на раздражители. В результате эту искусственную сеть можно считать биологическим компьютером/чипом. Его вычислительные процессы магистральны для органического интеллекта в принципе. ИСФ обладает следующими вычислительными особенностями.

1. Речь идет о системе N_0, V_0, w_0 , где:

- N_0 является нефундированным набором процессоров, названных филаментами. Этот набор нефундирован, потому что невозможно разделить N_0 на атомы или хотя бы на исключающие подмножества n_j , которые формируют разбиение N_0 . Другими словами, процессоры постепенно перепроектируются и могут появляться, исчезать, менять собственные свойства;

- V_0 – ряд кортежей $\{(i_t, j_t): i_t, j_t \in N_0\}$, чьи элементы являются соединениями между филаментом i_t и филаментом j_t во временном шаге t . Следовательно, набор V_0 нефундирован, он может меняться, как и число его процессоров, с течением времени t ;

- w_0 – функция от V_0 до *R , где *R – множество гиперреальных чисел такое, что $w_0({}^*i, {}^*j)$, где ${}^*i = i_0, i_1, i_2, i_3, \dots, i_n$ и ${}^*j = j_0, j_1, j_2, j_3, \dots, j_n$, называют весом соединения между филаментом *i и филаментом *j при поэтапном движении ($t = 0, 1, 2, 3, \dots$). Заметим, что филамент *i может быть скрыт (не существовать) в фактическом времени.

2. Каждый филамент ведет себя как искусственный организм (например, как искусственная клетка):

- он может расти;
- его поведение может быть привлечено/направлено хемотаксисом. В клетках всегда есть филаменты актина, некоторые из них умирают, некоторые рождаются.

3. Каждая неустойчивая сеть филаментов актина ведет себя как искусственный рой:

- она может расти;
- ее поведение может быть привлечено/направлено хемотаксисом;
- может происходить сплав двух роев (двух сетей филаментов актина) в один рой (одну сеть);

• может наблюдаться расщепление одного роя (одной сети) в два роя (две сети). В клетках всегда существуют сети филаментов актина.

4. Каждая связанная сеть филаментов актина ведет себя как метарой: реагирует на механические внешние побудители и может быть лишь частично реорганизована. Поперечно связанные сети используются в клетках для того, чтобы передать механический сигнал, возбуждавший поверхность клетки. Эти силы генерируют волны напряжения ниже предела упругости. Последние быстро распространяются через слои напряжения актина. Такие внешние механические напряжения могут подразумевать диффузию сетей филаментов актина. Так, вращение вокруг их оси, соударяющее сети филаментов, может распрямлять сети, но в случае цитоскелета механический сигнал передается по сетям, не разрушая их. Как следствие, в ответ на физическую силу смещение слоя напряжения активизируется в цитоскелете.

Сети филаментов актина ответственны за разумные клеточные реакции на все внешние сигналы. Так, если будет создан искусственный белковый бульон, который станет роботом, решающим комплекс различных задач (обучение, ориентация в пространстве, принятие решений о перемещениях и т. д.), то он будет состоять из филаментов актина, управляемых нами. Для нас ИСФ – математическая модель самопрограммируемой социальной сети. В частности, процессоры могут включаться и выключаться так, что сама топология сети может сильно меняться со временем. В данной динамической сети реализуется массивно-параллельная игра. Именно в таком направлении можно реализовать искусственную сеть автоматического принятия, например судебных решений.

И вот здесь появляется важный социологический вопрос. Мы можем моделировать социальное поведение бактерий, муравьев, пчел, отдельных млекопитающих с помощью ИСФ. Является ли их поведение социальным?

Все эти образцы коллективного поведения, подобного муравьиному (уход за выводком и разделение труда на репродуктивные и нерепродуктивные группы), считаются формой полноценной социальности – высшим уровнем организации общения животных [16]. Тем не менее довольно спорно считать коллективное поведение роя социальным. Это возможно, если концентрироваться, во-первых, на внешних стимулах, управляющих людьми, и, во-вторых, на социальных ролях (рабочий, королева и т. д.) людей как функций полезности для группы как таковой, т. е. только в том случае, если мы следуем, во-первых, за бихевиоризмом, представляющим любое коллективное поведение как сложную систему, которой управляют с помощью стимулов (особенно поощрения и наказания) [17], во-вторых, если мы разделяем идеи

структурного функционализма, рассматривающего целостность общества как систему функций (ролей) ее элементов [18]. Когда мы принимаем и бихевиоризм, и структурный функционализм, мы можем заявлять, что коллективное поведение животных, от социальных бактерий до социальных насекомых и млекопитающих, имеет те же основные паттерны поведения, которые проявляются и у людей.

Однако существуют различные подходы к социальному. Один из подходов, альтернативных бихевиоризму и структурному функционализму, представлен символическим интеракционизмом. Согласно ему коллективное поведение считается социальным, если в процессе взаимодействия возникают символические значения, проистекающие из взаимодействия агентов [19]. Другими словами, социальное поведение невозможно без материальной культуры, например без использования некоторых инструментов, всегда имеющих символические значения. Очевидно, в этом смысле коллективное поведение муравьев не может быть расценено как социальное. Для муравьев нет никаких инструментов и символических значений.

Но не только люди реализуют социальное поведение в значении символического интеракционизма. Известно, что дикие афалины (*Tursiops sp.*) «очевидно пользуются морскими губками в качестве инструментов для добывания еды» (перевод наш. – А. Ш.) [20], т. е. и такое поведение не может быть объяснено генетически или экологически. Перед нами – пример материальной культуры, и эта культура передается, по-видимому, матерями [20].

Кроме того, шимпанзе привлекают в свое взаимодействие инструменты – большие и маленькие палки и камни [21]. Обнаружено 39 различных моделей поведения шимпанзе, включающего использование инструмента [21]. Довольно интересный факт: некоторые образцы поведения шимпанзе в одном сообществе отсутствуют в других сообществах, т. е. можно говорить о различных традициях материальных культур шимпанзе [21]. Следовательно, коллективное поведение шимпанзе может быть оценено как отчасти социальное.

Так, в пределах символического интеракционизма нельзя рассматривать сложное коллективное поведение муравейника как социальное. Несocialное устойчивое коллективное поведение мы будем называть роевым. Его можно продемонстрировать на примере роя насекомых, стаи птиц, табуна лошадей, косяка рыб. В рое животные ведут себя коллективно. Так, в косяке или стае каждое животное старается двигаться в том же направлении, что и его сосед, оставаясь поблизости со своими соседями, но избегая столкновений с ними [22].

Группа людей, например пешеходов, также может следовать поведению роя [23]. Основанный на муравьях алгоритм может объяснить поведение посадки на самолет [9]. В ситуации паники

большинство людей также следуют алгоритмам поведения роя [23]. Дело в том, что риск перед хищником является главной особенностью роя [24], и в условиях риска (таких как террористический акт) быстро уменьшаются символические значения для возможных человеческих взаимодействий. Как следствие, социальное поведение преобразовывается в поведение роя.

Таким образом, стоит отличать поведение роя от социального поведения. Первое реализуется без символических взаимодействий, хотя может быть сложным и иметь элементы коллективного принятия решения. Риск перед опасностью является главной причиной сворачивания символических взаимодействий в человеческом коллективном поведении, но существуют иные факторы – факторы зависимости. Зависимость повышает роль внешних стимулов, т. е. аттрактантов. Стимулы, вызывающие зависимость – алкоголь, морфий, кокаин, половые сношения, азартные игры и т. д.

Известно, что любым роем можно управлять путем распределения стимулов (аттрактантов и репеллентов) [2], т. е. можно проектировать логические схемы, основанные на топологии стимулов [10]. Для роя нет символических значений, поведение полностью определяется внешними стимулами.

Зависимость от алкоголя воплощает версию роевого интеллекта для оптимизации действий по распитию алкоголя. Совместно с В. Фрисом, представителем частного медицинского унитарного предприятия «Исцеление» (г. Минск, Беларусь) мы проводили исследование, в ходе которого были опрошены 107 человек, страдающих алкоголизмом.

Все респонденты подтвердили, что предпочитают распивать алкогольные напитки в небольших компаниях от 3 до 7 человек, но при этом они готовы присоединиться к другим небольшим группам. Количество стабильных друзей для алкогольного возлияния – от 2 до 5. Анализ показал, что 63 % опрошенных считают, что семья и работа препятствуют им в употреблении алкоголя.

Эти небольшие группы от 3 до 7 человек могут рассматриваться как человеческий рой, помогающий его участникам распивать спиртное в безопасности, а также оптимизировать задачу распития спиртных напитков. 85 % респондентов отметили, что, если у них нет денег, члены группы всегда готовы заплатить за напитки; 91 % опрошенных считают, что могут купить алкоголь для кого-либо из группы, не имеющего на данный момент средств.

То есть присутствует некая солидарность в оптимизации совместного распития спиртного.

В группах, состоящих только из мужчин, распивают 35 % респондентов, в группах смешанного пола – 65 %. Половое поведение в таких случаях невеличается.

В случае вовлечения новых участников в группы доминируют следующие причины: эти новые участники – соседи или коллеги; они готовы расплатиться за алкоголь. Вход в новые группы возможен по приглашению друга или знакомого. Группы достаточно дружелюбны, единственная причина конфликтов – ссоры из-за регулярного нежелания платить. Так, 32 % опрошенных отметили, что готовы исключить одного участника из своей группы.

Только 28 % респондентов заявили, что в их группах есть лидеры. Это мужчины или женщины, перешагнувшие 40-летний рубеж. Лидерство состоит в поддержке группового интереса совместного распития спиртного.

Алкоголики формируют сеть, состоящую из нескольких небольших групп. И задача оптимизации совместного распития алкоголя решается не малой группой, а целой сетью, т. е. несколькими группами. Каждая небольшая группа зависимых появляется и исчезает при различных условиях. Сеть алкоголиков реализует алгоритмы ИСФ: рои сливаются и разделяются перед аттрактантами для оптимизации их эксплуатирования. Внешние стимулы (аттрактанты) для амебы – куски питательных веществ. Аттрактанты для алкоголиков представляются местами, где они могут безопасно выпивать в небольших группах. Это квартира или определенное место на улице. При этом 38 % опрошенных предпочитают пить в одном и том же месте, 62 % – в различных местах.

Как видим, зависимые от алкоголя люди реализуют версию роевого интеллекта для оптимизации распития спиртных напитков при различных условиях. В случае, если группы разделяются, мы сталкиваемся с LA, а в случае, если группы объединяются, мы имеем дело с LI.

Небольшие группы алкоголиков рассматриваются нами как вид человеческого роя. Эти рои строят сеть, в пределах сети алкоголики могут свободно перемещаться от одного роя к другому.

Таким образом, роевое поведение следует отличать от социального. Социальное поведение строится на символических значениях. В роевом поведении людей эти символические значения редуцируются.

References

1. Schumann A. Toward a Computational Model of Actin Filament Networks. *Proc. of the 9th Int. Joint Conf. on Biomed. Eng. Syst. and Technol.* 2016. Vol. 4. P. 290–297.
2. Adamatzky A., Erokhin V., Grube M., et al. Physarum Chip Project: Growing Computers From Slime Mould. *Int. J. Unconv. Comput.* 2012. Vol. 8, No. 4. P. 319–323.

3. Costerton J. W., Lewandowski Z., Caldwell D. E., et al. Microbial biofilms. *Annu. Rev. Microbiol.* 1995. Vol. 49. P. 711–745.
4. D’Ettorre P., Heinze J. Sociobiology of slave-making ants. *Acta Ethol.* 2001. Vol. 3, issue 2. P. 67–82. DOI: 10.1007/s102110100038.
5. Duffy J. E. The ecology and evolution of eusociality in sponge-dwelling shrimp. In: T. Kikuchi (ed.). *Sapporo Genes, Behavior, and Evolution in Social Insects*. Japan, 2002. P. 1–38.
6. Jarvis J. U. M., Bennett N. C. Eusociality has evolved independently in two genera of bathyergid mole-rats but occurs in no other subterranean mammal. *Behav. Ecol. Sociobiol.* 1993. Vol. 33, issue 4. P. 253–260. DOI: 10.1007/BF02027122.
7. Jacobs D. S., Bennett N. C., Jarvis I. U. M., et al. The colony structure and dominance hierarchy of the Damara-land mole-rat, *Cryptomys damarensis* (Rodentia: Bathyergidae) from Namibia. *J. Zool.* 1991. No. 224 (4). P. 553–576. DOI: 10.1111/j.1469-7998.1991.tb03785.x.
8. Helbing D., Keltsch J., Molnar P. Modelling the evolution of human trail systems. *Nature*. 1997. No. 388. P. 47–50.
9. John A., Schadschneider A., Chowdhury D., Nishinari K. Characteristics of ant-inspired traffic flow. *Swarm Intell.* 2008. Vol. 2, issue 1. P. 25–41. DOI: 10.1007/s11721-008-0010-8.
10. Schumann A. p-Adic valued logical calculi in simulations of the slime mould behavior. *JANCL*. 2015. No. 25 (2). P. 125–139.
11. Schumann A. Syllogistic Versions of Go Games on Physarum Polycephalum. In: A. Adamatzky (ed.). *Advances in Physarum Machines. Emergence, Complexity and Computation*. United Kingdom, 2016. P. 651–685.
12. Schumann A., Akimova L. Syllogistic System for the Propagation of Parasites. The Case of Schistosomatidae (Trematoda: Digenea). *Stud. Log. Gramm. Rhetor.* 2015. Vol. 40, issue 1. P. 303–319.
13. Jones J. D. Towards Lateral Inhibition and Collective Perception in Unorganised Non-Neural Systems. In: K. Pancerz, E. Zaitseva (eds). *Computational Intelligence, Medicine and Biology*. Berlin, 2015.
14. Schumann A., Akimova L. Syllogistic System for the Propagation of Parasites. The Case of Schistosomatidae (Trematoda: Digenea). *Stud. Log., Gramm. Rhetor.* 2015. Vol. 40, issue 1. P. 303–319.
15. Schumann A., Woleński J. Two Squares of Oppositions and Their Applications in Pairwise Comparisons Analysis. *Fund. Inform.* 2016. Vol. 144, issue 3–4. P. 241–254.
16. Michener Ch. D. Comparative Social Behavior of Bees. *Annu. Rev. Entomol.* 1969. Vol. 14. P. 299–342. DOI: 10.1146/annurev.en.14.010169.001503.
17. Skinner B. F. *About Behaviorism*. N. Y., 1976.
18. Parsons T. *Social Systems and The Evolution of Action Theory*. N. Y., 1975.
19. Blumer H. *Symbolic Interactionism. Perspective and method*. Englewood Cliffs, 1969.
20. Krützen M., Mann J., Heithaus M. R., et al. Cultural transmission of tool use in bottlenose dolphins. *PNAS*. 2005. Vol. 102, issue 25. P. 8939–8943. DOI: 10.1073/pnas.0500232102.
21. Whiten A., Goodall J., McGrew W. C., et al. Cultures in Chimpanzees. *Nature*. 1999. Vol. 399 (6737). P. 682–685.
22. Viscido S., Parrish J., Grunbaum D. Individual behavior and emergent properties of fish schools: a comparison of observation and theory. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 2004. No. 273. P. 239–249.
23. Helbing D., Keltsch J., Molnar P. Modelling the evolution of human trail systems. *Nature*. 1997. Vol. 388. P. 47–50.
24. Abrahams M., Colgan P. Risk of predation, hydrodynamic efficiency, and their influence on school structure. *Env. Biol. Fishes*. 1985. Vol. 13, issue 3. P. 195–202.