

УДК 681.5+004.896+004.8  
ББК 32.813

## МОДЕЛИ СОЦИАЛЬНОГО ПОВЕДЕНИЯ В ГРУППОВОЙ РОБОТОТЕХНИКЕ

Карпов В. Э.<sup>1</sup>

(НИИ «Курчатowskiй институт», Москва)

*Обсуждаются общие принципы организации взаимодействия в группах роботов, основанные на применении моделей социального поведения. На основе типизации сообществ предложен ряд моделей и методов, реализующих различные формы социальной организации в группах роботов. Рассмотрены такие основополагающие механизмы, как формирование коалиций, языковая коммуникация, распределение задач в коллективе. В основе модели индивидуальной организации особи, способной к социализации, лежит реализация психофизиологических особенностей на основе механизма эмоций и темперамента.*

Ключевые слова: групповая робототехника, модели социального поведения, языковое общение роботов, распределение задач в коллективе роботов.

### 1. Введение

Идея решения сложных технических задач большой совокупностью или группой сравнительно простых систем – роботов или агентов – давно была в центре внимания как робототехников, так и специалистов в области искусственного интеллекта. Пожалуй, основной вехой в плане теоретических основ построения таких систем можно считать исследования в области коллективного поведения автоматов, принадлежащих школе М.Л. Цетлина, см., например, [53]. В свою очередь первые практические результаты в виде реальных проектов в области

---

<sup>1</sup> Валерий Эдуардович Карпов, кандидат технических наук, доцент (karpov-ve@yandex.ru).

групповой робототехники, т.е. создания систем, состоящих из большого количества взаимодействующих роботов, насчитывают уже более четверти века. Появились и успешно развиваются такие направления, как коллективная, роевая, стайная и пр. робототехника, термин «распределенный интеллект» считается уже устоявшимся, а теория многоагентных систем считает групповую робототехнику ничем иным, как одной из своих основных сфер приложения.

Проводить даже поверхностный, укрупненный обзор проектов из области групповой робототехники в рамках данной статьи представляется нецелесообразным. Слишком велико количество существующих не только теоретических моделей, но и реально работающих систем. На запрос «swarm robot» Google выдает более 900 000 ссылок (в системе Scopus – более 3000 ссылок). Забегая вперед, заметим, что на запрос «robot ant» (робот-муравей – один из любимых объектов для подражания и проведения аналогий в групповой робототехнике) тот же Google выдает более 2 млн ссылок.

Однако приходится отметить, что до сих пор подавляющее число исследований в этой области остается на теоретическом, модельном уровне. Это хорошо видно по многочисленным обзорам, среди которых следует выделить [70] и [73]. Более того, декларируемый принцип решения сложных задач, неявное ожидание того, что множество простых роботов вдруг начнет проявлять эмерджентные свойства, – все это остается на практике лишь реализацией весьма скромных, малосодержательных задач. Эти типовые задачи, согласно работе [66] с фундаментальным названием «Введение в роевую робототехнику», выглядят так:

1. Агрегация (Aggregation). Задача образования компактной группы является основой для выполнения остальных, более сложных задач – совместного движения, формирования геометрической фигуры и пр.
2. Распределение (Dispersion). Это – задача распределения группы роботов в пространстве, причем таким образом, чтобы сохранялась возможность связи между ними и при этом покрывалась нужная область.

3. Создание форм (Pattern Formation). Создание неких геометрических форм путем изменения местоположения отдельных роботов.
4. Согласованное движение (Collective Movement). Задача координации движения группы роботов и их группового перемещения. Считается основной поведенческой задачей групповой или роевой робототехники.
5. Распределение задач (Task Allocation). Своего рода «опциональная», вспомогательная задача, которая заключается в распределении ролей, фрагментов большой задачи между членами группы.
6. Поиск источника (Source Search). Поиск некого источника сигнала, который может быть как точечным, так и распределенным (источник звука, запаха и т.п.).
7. Коллективное фуражирование или транспортировка объектов (Collective Transport of Objects). Совместное перемещение некоторого объекта группой роботов.
8. Коллективное картографирование (Collective Mapping). Согласованное построение карты области пространства большой совокупностью роботов.

Представляется, что отсутствие практически значимых результатов связано не только и не столько со слабой проработкой целого ряда важных практических и теоретических задач. Фрагментарный характер исследований в области групповой робототехники (если под этим понимать обобщенное название коллективной, роевой и т.п. робототехники) является следствием отсутствия серьезной методологической основы построения таких систем.

Весьма настораживающим признаком того, что дела обстоят не самым радужным образом, являются сугубо терминологические аспекты. Изначально считалось, что должна существовать некая иерархия, определяющая сложность организации совокупности роботов: роевая робототехника (самый простой вид, однородная совокупность роботов); групповая и/или стайная (более сложно организованная структура с признаками неоднородности); коллективная робототехника. Однако сейчас наблюдается явный перенос центра тяжести исследований именно в роевую робототехнику, которая может рассматривать-

ся как более простой, базовый уровень моделей групповой (в общем смысле) робототехники. С другой стороны, в роевую робототехнику мигрируют термины типа «коллектив», что видно по приведенному выше перечню задач [66].

И еще одно замечание. В определенном смысле можно говорить о том, что существует разрыв между примитивными моделями и методами уровня роевой робототехники и моделями, в которых членами коллектива являются сложные, интеллектуальные агенты. Отсутствуют «промежуточные» формы: либо решаются базовые задачи движения (пусть и согласованного), либо наблюдаются попытки решения сложных интеллектуальных задач.

Мы выдвигаем следующее предположение: в качестве единой методологической основы создания систем групповой робототехники целесообразно использовать модели социального поведения. При этом рассматривать эти модели как есть, т.е. с внешней, феноменологической точки зрения, не вдаваясь в этимологию, причины их возникновения. Этакий сугубо прагматический подход, сродни подходу «черного ящика» в системах искусственного интеллекта. Воспринимая задачи групповой робототехники в едином ключе, через призму моделей социального поведения, можно попробовать не только увязать между собой отдельные, фрагментарно решенные задачи, но и определить «белые места» на карте групповой робототехники, понять, какие механизмы требуется реализовать для того, чтобы возникли желаемые эмерджентные эффекты.

Такой прагматический подход несомненно и естественно вызывает ряд критики, однако, как мы постараемся показать дальше, он может быть вполне обоснован. Причем как с биологической и с технической сторон, так и с точки зрения получения вполне конкретных практических результатов.

## **2. Модели социального поведения**

### **2.1. ТЕХНИЧЕСКИЙ ПОДХОД**

Использование различных моделей поведения для реализации технических систем началось еще на заре кибернетики. Причем речь идет о реализации не только простейших видов поведения типа условно-рефлекторного, но и более сложных

моделей коллективного взаимодействия с элементами социального поведения. При этом повторим, что сейчас мы говорим о моделях взаимодействия элементов технических систем друг с другом, исключая социальность с точки зрения человеко-машинного взаимодействия.

Такая постановка вопроса, разумеется, не нова. В 60-е гг. 20 века сформировалась школа, изучающая различные модели поведения на основе конечных автоматов. Основным тезисом являлось утверждение, что любое достаточно сложное поведение складывается из совокупности простых поведенческих актов [53]. Первая работа, в которой был впервые предложен и использован термин «коллективное поведение автоматов», была опубликована еще в 1963 году. В результате исследований разнообразных форм поведения, начиная от условно-рефлекторного и заканчивая моделями коллективного поведения, была создана теоретическая основа для описания коллективного взаимодействия объектов самой разной природы [5]. В частности, на базе подобных моделей был разработан фундамент сотовой связи (задача о коллективе радиостанций, которым надо «договариваться» между собой о мощности своих сигналов) [46, 47]. В рамках автоматного подхода рассматривались такие интересные задачи, как игры автоматов, образование неоднородных групп автоматов с различными рангами рефлексии (способности рассуждать за других) и т.п. Теория коллективного поведения автоматов до сих пор является одной из очень немногих строгих, формальных моделей подобного рода систем.

С другой стороны, в классических работах Д.А. Поспелова, М.Г. Гаазе-Рапопорта, В.И. Варшавского и др. был рассмотрен целый ряд моделей поведения, в том числе группового, коллективного и даже социального, см., например, [6, 8]. Проблема, однако, в том, что эти модели, как и автоматные, формальные и относятся к категории «черных ящиков», предлагая реализацию феноменов механизмов взаимодействия как есть, в готовом и целостном виде. То есть в них не рассматриваются вопросы составляющих их базисных элементов и, как следствие, опускаются столь важные для нас вопросы генезиса механизмов социального поведения.

В уже упомянутой работе [8] приведен ряд примеров реализации механизмов поведения и дана вполне конструктивная схема классификации типов поведения, см. Рис. 1.

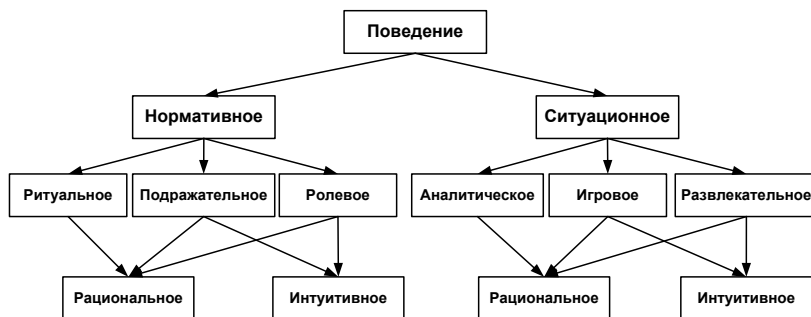


Рис. 1. Типы поведения по М.Г. Гаазе-Раннопорту и Д.А. Поспелову

Но нас интересует такая схема, которая могла бы объяснить принципы организации группы особей (агентов, роботов) для решения задач не индивидуального, а, в конечном счете, коллективного поведения. Сам по себе вопрос о том, где проходит граница между множеством особей и коллективом, тоже вызывает ряд определенных сложностей. По крайней мере, в групповой робототехнике понятия «рой», «стая», «группа» и «коллектив» зачастую используются достаточно бессистемно. В [17] предлагается различать понятия коллективного и стайного управления с точки зрения информированности членов группы о целях и задачах. Коллективное управление, например, подразумевает, что объекты, входящие в группу, имеют возможность не только обмениваться друг с другом информацией, но и знают о целях и задачах, имеют сведения о составе коллектива и т.д. Стайное управление, напротив, предполагает, что члены группы не имеют, вообще говоря, информационной связи с другими объектами, могут не знать состава и характеристик прочих членов группы. Условно различие между особью, роем, стаей и коллективом можно изобразить так, как показано на Рис. 2:



Рис. 2. Отличие множества особей от коллектива – в полноте информации о структуре группы, целях и задачах.

Однако и этот подход вряд ли может считаться удовлетворительным для понимания принципов организации сообществ. Обратимся поэтому к биологии, а точнее – к такому ее разделу, как этология.

## 2.2. МОДЕЛИ СОЦИАЛЬНОГО ПОВЕДЕНИЯ В ЖИВОТНОМ МИРЕ

Отметим еще раз, что далее мы будем рассматривать социальное поведение в животном мире. Социальное поведение характерно не только для общественных животных – приматов, пчел, муравьев и т.п., однако нас интересуют прежде всего именно они. Изучением социального поведения животных занимаются этологи, зоопсихологи и др. специалисты, представления которых о формальных моделях (и тем более – о конструктивных определениях) зачастую сильно отличаются от тех, которые имеются в технических науках, в том числе – в робототехнике.

Определения того, что такое поведение как таковое и социальное в частности, в этологии достаточно естественны и общи. Например, термин «поведение» определяется как способность животных изменять свои действия под влиянием внутренних и внешних факторов и является характерной чертой животного типа организации. Подчеркивается, что поведение имеет важное приспособительное значение, позволяя животным избегать негативных факторов окружающей среды, см. [3, 42, 51]. Немногим лучше является определение социального поведения.

**Социальное поведение животных** – общественное поведение животных, совокупность этологических механизмов,

регулирующих пространственно-демографические характеристики группы особей, определяющих специфическую для каждого вида поведенческую структуру и организацию (например, каждая особь имеет определенный ранг в зависимости от своего положения в иерархии сообщества или от качества занимаемой ее территории). Социальное поведение проявляется в виде различных взаимоотношений между особями и между их группировками, осуществляемых коммуникативным поведением [34].

Н. Гинберген [48] определяет социальное поведение у животных как взаимодействие между особями одного и того же вида, специально подчеркивая, что не всякая групповая активность будет социальной. Так, например, бегство животных от лесного пожара не является «социальным поведением», это реакция, вызванная инстинктом самосохранения. Хотя, как мы увидим дальше, это бегство может быть ничем иным, как проявлением такого механизма социального поведения, которое называется контагиозным.

Несколько иной подход имеется у Г. Блумера [4] и А.Я. Флиера [50]. У этих авторов социальное поведение – это такое поведение членов социума (популяции), которое обусловлено интересами общины, способствует ее сохранению и воспроизводству как целостной системы. Характерно, что это отличает социальное поведение от *коллективного поведения* (например, поведения толпы), которое не всегда имеет такую четкую детерминацию.

Важно, что биологическая ценность социального поведения животных состоит в том, что оно позволяет решать адаптивные задачи, которые для отдельно взятой особи являются непосильными. Это вполне созвучно основной парадигме групповой робототехники.

**Поведение и действие.** Еще одним интересным моментом является то, как в этологии определяются понятия «поведение» и «действие». Если поведение – это ответная реакция организма на внутренние или внешние раздражители (оно может быть рефлекторным, неосознанным или намеренным, осознанным), то действие – это только некоторые виды поведения [33]. С другой стороны, в [32] отмечается, что понятия «поведение» и



«действие» во многом совпадают, но различаются в основном тем, что поведение доступно наблюдению, более комплексно, имеет более выраженные паттерны и временные характеристики и, как правило, повторяется.

В робототехнике, напротив, действие считается неким более элементарным явлением, а поведение образуется совокупностью производимых роботом действий.

### 2.3. ТИПЫ СОЦИАЛЬНОГО ПОВЕДЕНИЯ

Этология, как и зоопсихология, привлекательна множественством различных видов типизации и интерпретаций феноменов животного мира. Это предоставляет определенную свободу в выборе и трактовке тех механизмов, которые могут быть интересны с точки зрения возможной технической реализации. И этим определяется типология важнейших типов социального поведения, показанная на Рис. 3 (см, например, [9, 15, 30, 48]).

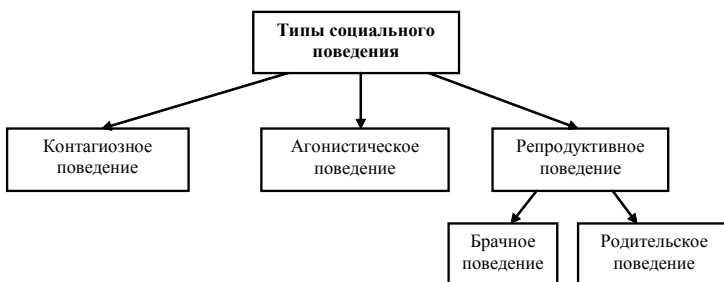


Рис. 3. Основные типы социального поведения

**Контагиозное поведение.** Оно же – так называемая «симпатическая индукция», или «заразное» поведение. Это поведение, которое инициируется одним членом группы и охватывает всю группу, приводя к координированным действиям или поведению. Это может касаться как сигналов опасности, подхватываемых остальными членами группы, так и пищевого и пр. поведения.

**Агонистическое поведение** («драка» у Тинбергена, [48]) включает широкий диапазон реакций. От нападения-угрозы на

одном полюсе до избегания-страха на другом. Для реализации такого типа поведения необходимо умение особей не только отличать своих сородичей от чужих, но и различать своих сородичей. В [15] утверждается, что поддержание структуры сообщества осуществляется именно на основе агонистического поведения (нападения, угрозы, подчинение и бегство). Установление иерархии может происходить в результате прямых столкновений и драк. Это вполне соответствует тому, насколько много внимания уделяется агрессивному поведению в [9].

**Репродуктивное поведение.** Этот тип социального поведения животных связан с размножением. Основные составляющие репродуктивного поведения – это брачное (половое) поведение, определяющее в конечном итоге оплодотворение, а также родительское поведение, связанное прежде всего с процессом ухода и обучением. С точки зрения групповой робототехники нас интересует прежде всего аспект обучения.

Типизация социального поведения – это базовая схема, позволяющая определить лишь основные направления построения систем групповой робототехники. Теперь настала пора рассмотреть более детально устройство групп, позволяющих строить социальные системы.

## 2.4. СОЦИАЛЬНЫЕ СООБЩЕСТВА

Начнем с принятых в этологии определений.

**Сообществом** называется такой тип внутривидовых отношений, при котором особи образуют стабильные группировки, занимающие и защищающие определенную территорию [15]. Они поддерживают постоянный обмен информацией, находятся в некоторых относительно постоянных отношениях и скрещиваются преимущественно друг с другом. Сообщество включает в себя, как правило, небольшое число особей. Это более мелкая, чем популяция, группа особей данного вида, которую иногда называют *микрорепродукцией*.

**Организованное сообщество.** Для того чтобы группа животных была названа организованным сообществом, должны выполняться пять правил [13]:

1. Наличие системы коммуникаций. Все организованные сообщества обладают сложной системой непосред-

ственного общения путем передачи друг другу различных сигналов – звуков, жестов, мимики, положения тела и др.

2. Разделение функций, основанное на специализации (имеется вожак, на поведение которого ориентируются все остальные животные).
3. Когезия, т.е. стремление особей держаться в более или менее тесной близости друг к другу.
4. Постоянство состава. Миграции в сообществах почти не происходят. Особи, составляющие сообщество, знают друг друга «в лицо», т.е. индивидуально распознают друг друга.
5. Затрудненный доступ для особей того же вида, не являющихся членами данной группы. Сообщество сопротивляется иммиграции «чужаков».

Эти пять правил или признаков характеризуют конечный результат развития социума. Нас же больше интересует схема, позволяющая отобразить развитие социума от простейшей формы до этого самого организованного сообщества.

Для этого мы переходим, согласно [31] и [44], к конструктивной схеме, на которой представлены виды сообществ, см. Рис. 4.

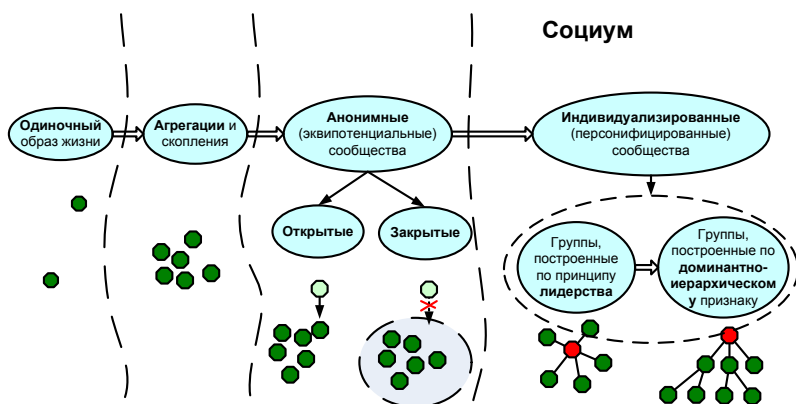


Рис. 4. Виды сообществ. Усложнение структуры групп

**1. Одиночный образ жизни.** Достаточно очевидный и не нуждающийся в пояснениях вид.

**2. Агрегации (скопления).** Сообщества, даже самые примитивные, следует отличать от скоплений, или агрегаций, животных. Это такие объединения животных, которые формируются под действием какого-то физического фактора среды (пищи, температуры и т.п.). Примером агрегации могут служить стайки голостиков в прогретых солнцем местах водоема [15]. Скопления характерны для многих видов беспозвоночных.

**3. Анонимные сообщества.** Согласно [29] все сообщества животных можно разделить на два класса: *анонимные*, в которых нет ничего похожего на структуру (ни группировок, ни вожаков, ни ведомых), и персонифицированные, основанные на личных контактах, в которых возможно распределение ролей. Сообщество животных, персонально не знающих друг друга, называют *анонимным*. В анонимных сообществах, например, в зависимости от ситуации, может сформироваться временный лидер, определяющий движение группы. Поэтому такое сообщество называют *эквипотенциальным*. В зависимости от отношения к «чужакам», принадлежащим, естественно к тому же виду, анонимные сообщества делятся на *открытые* и *закрытые* (замкнутые). В открытом анонимном сообществе члены группы не проявляют агрессии по отношению к вновь присоединившимся особям своего вида. В закрытом сообществе его члены не различают друг друга «персонально», но могут выделять животных, принадлежащих к другому сообществу («чужаков»), например, по запаху.

**4. Индивидуализированные сообщества.** Более высокий тип общественной организации – это *индивидуализированные* (*персонифицированные*) сообщества, т.е. объединения животных с упорядоченной структурой, в которых каждый член «знает» всех остальных «персонально» («в лицо») [29]. Для подобных групп характерно сочетание проявлений типичных черт *иерархии доминирования* с более сложными «личными» отношениями между отдельными особями. При этом помимо иерархии доминирования с неизбежными проявлениями агрессии в таких сообществах проявляется *феномен «ролей»*, когда лидерство попадает к наиболее опытным членам группы, распределяющим эту обязанность между собой.

Для сравнительного изучения структурных и иных особенностей сообществ животных полезно выделить признаки, по которым группировки особей разных видов могут различаться между собой. Важнейшими признаками при этом оказываются [15]:

- устойчивость группировок во времени;
- взаимная координация действий особей в группе;
- прочность связей между особями;
- поддержание целостности группы (агрессия по отношению к «чужакам» своего вида).

Объединив типологию видов сообществ (Рис. 4) и вышеперечисленные признаки, мы получим схему, отображающую наличие/отсутствие признаков у различных группировок, см. таблицу 1.

Таблица 1. Виды и признаки сообществ

Вид сообщества		Признак			
		Устойчивость во времени	Взаимная координация	Прочность связей	Агрессия к чужакам
1. Одиночный образ жизни		-	-	-	+
2. Агрегации и скопления		-	-	-	-
3. Анонимные сообщества	открытые	-	+	-	-
	закрытые	-	+	-	+
4. Индивидуализированные сообщества	по принципу лидерства	+	+	+	+
	по доминантно-иерархическому признаку	+	+	+	+

## 2.5. УСЛОЖНЕНИЕ СТРУКТУРЫ ГРУПП

В этологии определены весьма четкие критерии и характеристики структур групп [54]. Простейшую структуру имеют группы экvipотенциального типа, состоящие из особей, близких по своим морфофизиологическим признакам (стада и стаи такого типа носят, как правило, характер анонимных сообществ). Далее идут группы, построенные по принципу лидерства (характеризуются определенной разнофункциональностью составляющих их особей, на основе которых формируется внутrigрупповая структура), а также группы, построенные по доминантно-иерархическому типу с вожаком.

Другим критерием типизации структур является специализация особей [16]. Согласно нему с точки зрения социального поведения животных можно разделить на следующие основные группы:

1. Индивидуалисты, т.е. животные, ведущие строго изолированный образ жизни. Признаков социального поведения не наблюдается.
2. Временные связи, семьи. В таких группах специализация слаба, но в них имеется вожак или лидер.
3. Стада. Объединения с малой специализацией.
4. Колонии. Общественное объединение с разделением определенных функций.
5. Сообщества. Общественные объединения со строгой специализацией и со сложной координацией. Наиболее сложная форма социального поведения животных. Общественные животные, т.е. животные, живущие сообществом, отдельно существовать не могут, т.е. сообщество – это своеобразный организм, в котором каждая особь может жить только вместе со всеми остальными.

Сообщества организованы по двум главным факторам – территориальности и доминированию [13]. Исходя из этого, выделяют две системы иерархии [49]:

- относительная иерархия – основана на закреплении территории за какой-либо особью;
- абсолютная иерархия – это иерархия в группе.

Различается ряд форм абсолютной иерархии [49]: от деспотической, семейной, линейной и т.д. до доминирования по определенному поведенческому акту. На самом деле эта типизация уже не так важна для задач групповой робототехники, так как эти формы определяются конкретикой задач. Более конструктивными являются два следующих момента.

1. В некоторых сложных системах иерархии наблюдается образование временных коалиций, направленных либо на достижение «сиюминутной выгоды», либо на то, чтобы повысить свой общий ранг [15].

2. Одним из механизмов определения лидера является выделение доминанта: когда особь в своем поведении не ориентируется на других особей, а остальные на неё ориентируются, то такая особь является доминантом.

## 2.6. МЕХАНИЗМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СОЦИАЛЬНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Настала пора определиться с теми базовыми механизмами, которые задают рассмотренные выше принципы социальной организации. Соответствие базовых механизмов поведения основным типам социального поведения приведено в Таблица 2.

Таблица 2. Типы поведения и механизмы их реализации

Типы поведения		Механизмы поведения
Контагиозное поведение		1. Коммуникативные сигналы 2. Симпатическая индукция 3. Подражательное поведение
Агонистическое поведение		1. Агрессия ↓ 2. Драки (конфликты) ↓ 3. Ритуалы и демонстрации (ФКД) ↓ 4. Социальное доминирование
Репродуктивное поведение	Брачное	1. Драки 2. Ритуалы и демонстрации
	Родительское	3. Разделение труда 4. Усвоение опыта предыдущих поколений

Здесь стрелки показывают своего рода градацию видов агонистического поведения – от непосредственного нападения до его более «мягких» форм и проявлений.

Рассмотрим далее механизмы поведения, которые обеспечивают поддержание структуры в группе (для анонимных и персонифицированных сообществ), Таблица 3.

Таблица 3. Механизмы поддержания структуры групп

Анонимные группы	Персонифицированные группы
<ul style="list-style-type: none"><li>• Кинописис</li><li>• Подражательные реакции</li><li>• Симпатическая индукция</li><li>• Коммуникативные сигналы</li><li>• Синхронизация деятельности</li><li>• Система специальных адаптаций</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Агрессия</li><li>• Доминирование и подчинение (система иерархии)</li><li>• Иерархия ролей и разделение труда (ролевая иерархия)</li><li>• Прямые конфликты (драки)</li><li>• Ритуалы и демонстрации (ФКД)</li></ul>

Здесь пометка «ФКД» означает так называемые *фиксированные комплексы действий*. Очень важно, что значение ФКД бывает понятно всем членам данного вида без специального обучения [15].

Дадим краткие комментарии к приведенным в таблицах механизмам.

*Коммуникационные сигналы*. Важнейшими, качественно новым в социальном поведении является наличие реакций, направленных не на взаимодействие с природой, а на изменение других членов группы. Это так называемые *коммуникативные сигналы* [16]. В простейшем случае такие взаимоотношения основаны на тенденции индивида реагировать на движения или иные действия других членов группы. Причем социальные животные могут быть чувствительны даже к слабо выраженным движениям – к так называемым *движениям намерения* [48].

*Симпатическая индукция* (заразное или контагиозное поведение). Простейший тип сотрудничества, реализация принципа



«делай, как я» [48]. Важно, что это не подражание, так как реагирующие особи не научаются выполнять определенные движения, наблюдая за действиями других. Здесь речь идет о появлении такого же настроения и, как следствие, происходит врожденная двигательная реакция. Основная функция такого поведения – *синхронизация* деятельности членов группы.

*Система специальных адаптаций.* Включает в себя врожденный стереотип поведения, выражающийся в непрерывной ориентации на соседних особей, а также ярко выраженные *подражательные реакции* [44]. Служат для поддержания стада или стаи как устойчивого целого и обеспечения определенной *синхронизации* их деятельности.

*Кинописис.* Согласованная реакция на биологически значимые сигналы, которые могут иметь разную модальность [15].

*Агрессия.* Один из основных механизмов в поддержании структуры сообщества. Основные функции внутривидовой агрессии – это обеспечение изоляции группы в пределах одной популяции, противодействие проникновению в данное сообщество чужих особей, а также регуляция численности популяции.

*Ритуалы и демонстрации.* Являются, вообще говоря, формой агрессии без явных драк и нападений, т.е. без прямого конфликта. Ритуал – это обмен соответствующими сигналами и позами, которые называют демонстрациями. Как правило, ритуалы представляют собой *фиксированные комплексы действий* (ФКД). Агрессия, ритуалы и демонстрации, устанавливающие иерархические отношения между животными и поддерживающие структуру сообщества, осуществляется на основе *агонистического поведения*, т.е. комплекса реакций нападения, угрозы, подчинения и бегства.

*Разделение труда.* Основывается на формировании иерархии ролей в сложных и высокоорганизованных сообществах. В таких сообществах возникают новые типы отношений, называемых *«ролевой иерархией»* [15].

*Усвоение опыта старшего поколения* представляет собой сложный комплекс реакций, связанных с процессом обучения. В основе усвоения лежат многие из рассмотренных выше механизмов, и в этом смысле усвоение опыта может рассматриваться

не как базовый, а как производный, синтетический механизм социального поведения.

## 2.7. ЭУСОЦИАЛЬНЫЕ НАСЕКОМЫЕ

Прежде чем сформировать окончательный перечень базовых механизмов, которые определяют принципы социальной организации, необходимо рассмотреть вопрос выбора наиболее подходящего объекта моделирования.

Среди множества видов живых организмов, обладающими признаками социального поведения, существуют виды, образующие так называемые *эусоциальные сообщества*. Термином «эусоциальность» (т.е. истинная социальность) обозначают наиболее сложную форму общественной организации, которая характерна для некоторых видов насекомых. Иногда такие виды насекомых называют общественными. У общественных видов социальная организация характеризуется следующим признаками [15]:

1. Репродуктивная дифференциация в группе: одни особи размножаются, а другие – рабочие особи – бесплодны.
2. Кооперация между членами группы, т.е. совместное добывание пищи, выкармливание потомства, строительство, защита гнезда и т.п.
3. Преимущество поколений: особи не менее двух последовательных поколений живут вместе на тех стадиях жизненного цикла, когда они выполняют функцию «рабочих».
4. Специализация. Разделение рабочих функций между членами сообщества.

Специализация функций – это один из наиболее сложных и интересных механизмов. Широко известна специализация пчел, у которых имеются строители, фуражиры, вентиляторщики, сборщики меда и пыльцы и т.д. При этом у пчел эта специализация является *функциональной*, т.е. каждая пчела может выполнять различные виды работ. У муравьев перечень «профессий» не меньше, однако их специализация является прежде всего анатомической, т.е. особи, выполняющие различные функции различаются морфологически (физически, психологически и т.п.) [16], хотя на самом деле их профессиональная кастовость

не мешает муравьям некоторых видов менять в случае необходимости свою профессию [14].

Обобщив все сказанное выше, можно сделать следующие выводы. Исключим из рассмотрения репродуктивную функцию, которая присутствует у животных и отсутствует у роботов, и все связанные исключительно с ней механизмы социального поведения. Тогда окончательный набор механизмов, обеспечивающих различные уровни социального поведения, и условий, при которых группу можно определить как социум, будет выглядеть следующим образом:

1. Наличие закрепленной за группой территории.
2. Постоянный состав группы (устойчивость во времени, прочность связей, агрессия к чужакам).
3. Когезия (стремление членов группы держаться вместе).
4. Персонафикация в группе (каждый член «знает» всех остальных «персонально»).
5. Система коммуникаций для взаимной координации и синхронизации деятельности членов группы (коммуникативные сигналы, симпатическая индукция, подражательная реакция, кинопсис).
6. Социальное доминирование (иерархия в группе) через ритуалы и демонстрации.
7. Специализация (разделение функций, феномен ролей).
8. Образование коалиций (кооперация).
9. Усвоение опыта старших поколений (в нашем случае – обучение).

При реализации различных комбинаций этих механизмов можно моделировать различные уровни социализации у группы роботов. При реализации всех перечисленных механизмов и условий (с адаптацией к эмоциональной составляющей роботов – базовому «физиологическому» уровню организации агента) группу роботов можно будет отнести к социальной группе с наиболее сложной формой общественной организации.

Примем наличие закрепленной за группой территории и постоянный состав группы как начальные *обязательные условия* существования социума. При этом одиночный образ жизни и агрегации (скопления) исключаем из рассмотрения, так как они не носят признаков организованных сообществ.

Тогда итоговый перечень механизмов поведения, которые реализуют рассмотренные виды сообществ, будет выглядеть так, как это представлено в Таблица 4.

Таблица 4. Итоговый перечень механизмов социального поведения

	Тип сообщества		Механизмы поведения
	Анонимные сообщества	открытые	1. когезия; 2. усвоение опыта старших поколений (обучение); 3. система коммуникаций для взаимной координации и синхронизации деятельности членов группы;
		закрытые	4. агрессия к чужакам
Социум	Индивидуализированные сообщества	по принципу лидерства	5. персонификация в группе; 6. социальное доминирование (поведение стаи зависит от поведения лидера); 7. малая специализация; 8. образование коалиций;
		по доминантно-иерархическому признаку	9. специализация с разделением определенных функций (того же лидерства, например);
	Эусоциальные сообщества		10. персонификация в группе (только на уровне принадлежности к группе и выполняемой функции, «в лицо» – только внутри семьи); 11. строгая специализация (вне сообщества особь погибает).

При этом важно отметить, что перечень механизмов поведения образует некий ряд, определяющий их развитие и усложнение. Последовательная реализация элементов этого ряда определяет образование соответствующих типов сообществ.

Примечание: везде должны соблюдаться базовые условия – наличие закрепленной за группой территории и постоянный состав группы.

### **3. Как построить муравья**

Итак, у нас имеется итоговый перечень механизмов поведения, обеспечивающих социальное поведение, а также представление о том, что как с технической, так и методологической точек зрения наиболее целесообразно выбрать в качестве объекта изучения и моделирования эусоциальные сообщества. Одним из наиболее явных представителей эусоциальных групп являются муравьи, эволюция которых насчитывает по некоторым оценкам около 130 млн лет. Этого срока достаточно для того, чтобы считать муравьиные общественные отношения вполне сложившимися и изучать в том виде, как они есть, без исторической ретроспективы.

#### **3.1. МУРАВЬИ *FORMICA***

Среди известных примерно 8000 видов муравьев рыжие лесные муравьи из рода *Formica* относятся к одной из наиболее прогрессивных групп муравьев. Далее дадим их характеристику в форме краткой справки согласно классическим работам Длусского [11] и Захарова [14].

**Гнездо.** Купол до полутора метров высотой. Состоит из множества секций, камер, служебных и спальных помещений. Численность населения – от нескольких десятков до нескольких сотен тысяч особей.

**Муравьиные тропы.** Ведут к кормовым участкам. Тропы ухожены. Протяженность – десятки и сотни метров, ширина – до метра. Тропы действуют иногда десятки лет. Совокупность троп составляет охраняемую территорию данного муравейника. Кстати, считается, что муравьи *Formica* свои дороги запахом не метят.

**Ориентация и память.** Муравьи могут ориентироваться по солнцу. Фуражир, идущий в поисках пищи по однородной местности, сохраняет постоянный угол к солнцу. Муравьи удерживают в памяти направление движения по отношению к солнцу не менее 5 дней. Судя по всему, муравьи обладают фотографической памятью. Муравьи-охотники ориентируются, запоминая окружающий ландшафт. Муравьи способны запомнить относительное расположение каких-либо выдающихся предметов в ландшафте (камней, палочек и т.д.) и выстраивают свой маршрут по этим ориентирам.

**Центральная нервная система.** Состоит из ряда ганглиев, связанных между собой. Наиболее важной частью является надглоточный ганглий, или «мозг» муравьев, в котором образуются временные связи. Временные связи образуются у муравьев в грибовидных телах, являющихся аналогом коры головного мозга позвоночных. Размеры грибовидных тел муравьев связаны со способностью различных видов к образованию условных рефлексов. У рабочих *Formica* грибовидные тела составляют 1/2 объема мозга (у пчелы, например, грибовидные тела составляют всего 1/15 размеров мозга, несмотря на то, что мозг их относительно больше).

Всего нервная система муравья содержит порядка 1 млн нейронов (из них собственно в мозгу – надглоточном ганглии) – порядка 500 тыс. шт. Мозг муравья — это примерно 6% от общего веса тела насекомого (у человека это соотношение всего 2%).

Схематически устройство муравья приведено на Рис. 5 [11].

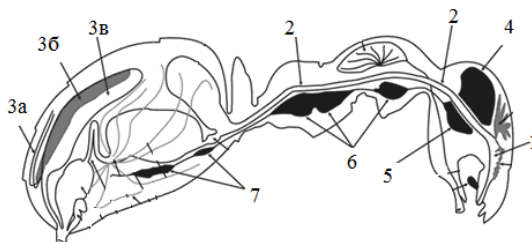


Рис. 5. Муравей рода *Formica*. 1 – глотка; 2 – пищевод;  
3 – ядовитая железа; 4 – надглоточный ганглий;  
5 – подглоточный ганглий; 6 – грудные нервные узлы;  
7 – брюшная нервная цепочка

**Сенсоры.** Муравьи ощущают запах и обладают органами вкуса. Чувствительные клетки, воспринимающие запах, расположены преимущественно на жгутиках усиков, т.е. на подвижных органах, на некотором расстоянии от оси тела. Каждый усик может двигаться, так что запах насекомые воспринимают, судя по всему, вместе с пространством и направлением, для них это единое, стереоскопическое чувство.

**Зрение.** Область точного зрения муравья не превышает 1–2 см. При этом, как и большинство «простейших», муравьи видят прежде всего не форму, а движение и цвет. Сами органы зрения представлены большими фасеточными глазами и тремя простыми глазками, функция которых пока не очень ясна.

**Слух.** Раздражением, вызывающим слуховые восприятия, по-видимому, является не изменение давления, а скорость движения молекул, максимальная в центре волн. Считается, что звук для муравьев не играет существенной роли.

**Взаимодействие муравьев.** Основные каналы взаимодействия между особями при внутрисемейном взаимодействии – это пищевой и сигнальный. Муравьи регулярно обмениваются пищей — кормят друг друга (так называемый трофаллаксис, одной из форм которого является взаимное облизывание). При этом происходит обмен ферментами. Изменения содержания различных ферментов в пищевой цепи может ускорить или, наоборот, замедлить рост и развитие молоди, стимулировать взрослых муравьев к переходу в ту или иную профессиональную (функциональную) группу. Недостаточная мощность пищевого потока означает голодание семьи и стимулирует фуражиров на поиск добычи.

### *3.2. ФЕНОМЕНОЛОГИЯ СОЦИАЛЬНОГО ПОВЕДЕНИЯ МУРАВЬЕВ*

**Деятельность муравьев.** Перечислим кратко лишь некоторые наиболее интересные виды:

- Разведение тлей. Муравьи активно заботятся о тлях: защищают от вредителей, переносят на наиболее подходящие участки растения и проч.

- Собираательство. Муравьи собирают семена различных трав и хранят в специальных сухих хранилищах своих гнезд.
- Охота и агрокультура. Амазонские муравьи умеют строить ловушки для насекомых гораздо более крупных, чем они сами. Другие амазонские муравьи, живущие в стволах деревьев определенного вида, убивают ростки прочих растений, впрыскивая в их листья муравьиную кислоту.
- Выращивание грибов. Муравьи некоторых видов устраивают в своих муравейниках грибные плантации для снабжения высококалорийной белковой пищей.
- Охрана своих плантации от вредителей и паразитов. Для борьбы с грибами-паразитами муравьи используют мощные узкоспециализированные антибиотики.

**Профессии и психологические склонности.** По мере роста муравьиной общины разделение функций становится все более глубоким: число профессий рабочих муравьев возрастает, а специализация каждой особи сужается. Основами для специализации рабочих муравьев стали их физиологическое состояние и психические склонности. Например, более инициативные, с быстрой реакцией муравьи становятся разведчикам или охотниками, крупные – солдатами, а особи, имеющие замедленную реакцию и минимум любознательности, – обслуживающими рабочими и фуражирами. Это – так называемый кастовый политизм. Однако муравьи способны менять профессии. Например, при гибели значительной части муравьев-фуражиров оставшиеся рабочие внутригнездовые муравьи берут на себя их работу.

**Обучение и профессиональный рост.** В семье одновременно присутствуют особи нескольких поколений, при взаимодействии которых происходит обучение начинающих фуражиров более опытными. Например, каждый фуражир начинает свою внегнездовую деятельность на периферии охраняемой территории семьи. В дальнейшем он постепенно переходит на все более близкие к гнезду индивидуальные поисковые участки, а заканчивается этот путь на куполе, где муравей несет службу в



качестве наблюдателя. Это – вершина «профессиональной карьеры» муравья.

**Механизмы социального образования. Обмены.** Основным признаком «свой – чужой» для муравьев является запах. Если же сообществу приходится делиться на обособленные группы (колонны, колонии, федерации, о чем будет сказано далее), то трофаллаксис перестанет играть свою роль. И тогда начинается работать механизм обмена – важнейшая для поддержания целостности семьи операция – регулярный обмен личинками, куколками и молодыми рабочими.

**Колонны.** По достижении некоторой критической численности, «население» крупного муравейника делится на так называемые колонны – обособленные подгруппы муравьев. У каждой колонны есть своя кормовая дорога, члены каждой колонны живут в своей секции муравейника.

**Поликалия.** Для рациональной организации семьи и при перенаселенности гнезда формируется поликалия – обитание одной семьи в нескольких взаимосвязанных гнездах. Помимо основного гнезда муравьи сооружают вспомогательные, выполняющие различные функции микрогнезда – укрытия от непогоды (так называемые «станции» и «павильоны»), кормовые почки и пр.

**Колонии.** Поликалия не спасает от перенаселения. И тогда естественным ходом событий становится почкование муравейника. В результате почкования возникает новое образование – колония, состоящая из материнского и одного или нескольких дочерних муравейников. Семьи, входящие в одну колонию, связаны дорогами, по которым производятся обмены (специальные обменные дороги). Именно благодаря обменам сохраняется в течение длительного времени особые лояльные, так называемые колониальные отношения между муравейниками.

**Федерации.** Длительный процесс образования отводков (колоний) ведет в конечном счете к перенаселению. И тогда формируются федерации – своего рода панмуравейник. Задача федерации – ограничение общей численности муравьев в системе. Результатом регуляции в федерации является сохранение основных структурных единиц. Федерация – высшее достижение социальной организации у муравьев. Устойчивость федера-

ции значительно выше, чем обособленной колонии. Причем все это достигается одними и теми же средствами – обменами.

### 3.3. МУРАВЬИ С ТЕХНИЧЕСКОЙ ТОЧКИ ЗРЕНИЯ

Исходя из приведенного выше краткого и, пожалуй, поверхностного описания функционала особи и некоторых феноменов их общественного поведения, становится очевидным некоторый начальный перечень задач. При этом помимо реализации механизмов социального поведения необходимо разобратсья с целым перечнем проблем, связанных с реализацией особи – муравья. Это и такая глобальная задача, как реализация сложнейшей системы управления, и реализация психических механизмов, и такие на первый взгляд «технические» задачи, как создание средств коммуникации, сенсорики, системы питания и пр. Образно этот перечень изображен на Рис. 6.



Рис. 6. Перечень основных задач по созданию муравья

Если несколько детализировать эти задачи, то обнаружится весьма характерная картина распределения «зон ответственности» между робототехникой, искусственным интеллектом и роевой робототехникой при создании особей, способных к социальному поведению, см. Рис. 7.

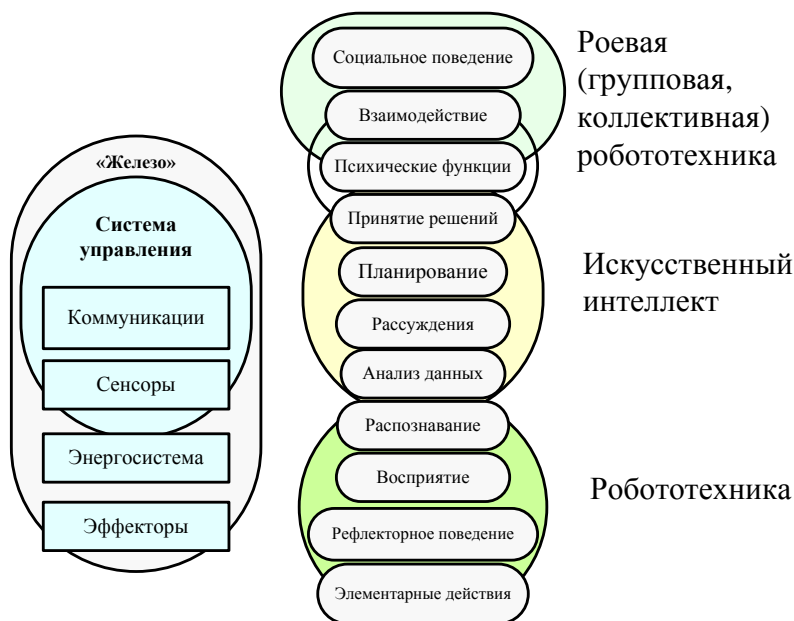


Рис. 7. Задачи и распределение «зон ответственности»

В определенном смысле можно сказать, что предметом «классической» робототехники является, прежде всего, нижний, базовый уровень, включающий как аппаратные решения (в частности то, что на Рис. 7 обозначено как «железо»), так и методы реализации моторных и двигательных функций. В свою очередь зоной ответственности искусственного интеллекта является средний уровень – уровень планирования, рассуждений, анализа данных и т.п. А реализация моделей социального поведения – это уже прерогатива роевой робототехники, хотя исходя из вышеизложенного правильнее было бы говорить о коллективной или групповой в общем смысле робототехнике. На данный же момент, повторим, центр тяжести исследований современной роевой робототехники лежит совсем в иной области – в области согласованного движения.

И еще один очень важный момент, касающийся того, почему именно муравей может считаться очень удобным объектом для моделирования. Дело в том, что механизмом обучения

муравья можно пренебречь, полагая, что за 130 млн лет эволюции этих насекомых у них сформировались вполне законченные рефлекторные модели поведения – им просто незачем учиться. Это означает, что структурно система управления муравья может быть представлена множеством законченных функциональных моделей, реализующих жесткие, фиксированные программы действий.

**Обучение.** Здесь следует сделать важное замечание к вопросу об *обучении муравьев*. Считается, что муравьи способны обучаться. Причем в основе способности муравьев к обучению лежит хорошая память. Кроме того, в процессе обучения большое значение имеет реакции подражания. И тем не менее мы говорим о том, что механизмом обучения муравья можно пренебречь. Здесь нет противоречия. Дело в том, что обучение может рассматриваться в двух аспектах. Первый – это процесс образования стимул-реактивных связей. Это то обучение, которое отвечает за рефлекторную деятельность. Второй аспект – это формирование у системы новых навыков, новых поведенческих реакций. Собственно говоря, мы пренебрегаем именно вторым – навыковым – аспектом поведения. У муравья все навыки, все поведенческие программы уже сформированы. Мы предполагаем, что он не меняет своего поведения с точки зрения изменения структуры своей системы управления. Муравей выбирает ту или иную поведенческую программу в зависимости от ситуации.

#### **4. Модели и методы реализации социального поведения**

##### **4.1. ОБЩАЯ СХЕМА МОДЕЛЕЙ СОЦИАЛЬНОГО ПОВЕДЕНИЯ**

Мы подошли к центральной, ключевой схеме настоящей работы. Эта схема определяет, какие модели и методы могут реализовать основные механизмы поведения, которые, в свою очередь, задают типы сообществ (Рис. 8).

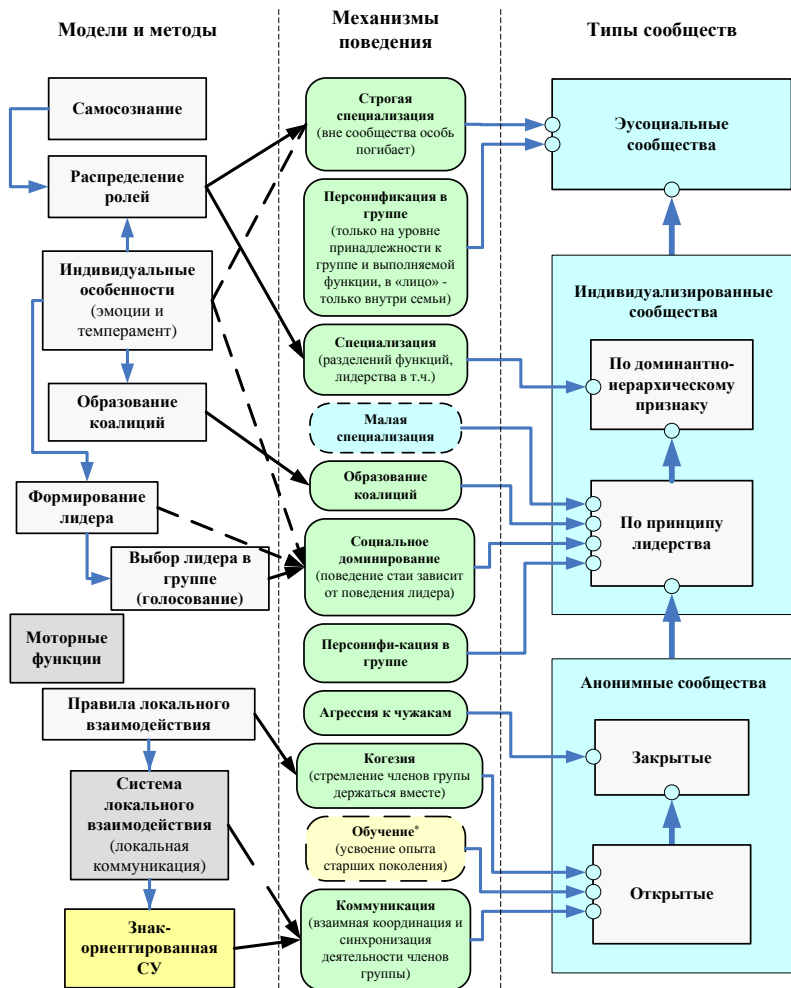


Рис. 8. Модели и методы реализации социального поведения

Перечень моделей весьма фрагментарен. В большей степени он основан на имеющихся на данный момент результатах. Однако и этого достаточно для того, чтобы понять, насколько мы близки к решению задачи появления действительно эмер-

джентных свойств групп роботов на основе реализации моделей социального поведения.

Далее мы рассмотрим кратко некоторые наиболее интересные из этих моделей и методов, начиная с тех, которые описывают устройство индивидуума, и заканчивая моделями их взаимодействия.

## *4.2. УСТРОЙСТВО ИНДИВИДУУМА*

### *4.2.1. ЭЛЕМЕНТНЫЙ БАЗИС*

Технических решений, описанных в литературе, а также представленных на рынке, существует великое множество. Например, хороший обзор по архитектуре микророботов приведен в [58]. Там же приведена весьма обширная библиография и ссылки на различные ресурсы. Показательно, что для реализации сложных движений (в том числе прыжков) исследователи зачастую изучают движения насекомых. Диапазон проектов весьма широк. Это и открытые проекты по созданию микророботов, среди которых следует отметить SwarmRobot [60, 61, 72], и предельно простые и дешевые устройства проекта Kilobot (разработчики – Группа исследования самоорганизующихся систем Гарвардского университета и Политехническая школа Лозанны, [69]), и весьма серьезные исследовательские роботы EPORO фирмы Nissan [67], см. Рис. 9.

Несмотря на существующие технические сложности (например, проблема питания не имеет до сих пор удовлетворительного решения), будем считать, что аппаратный базис, пригодный для решения сложных поведенческих задач, имеется. А скромность возможностей сенсорики и вычислительной мощности будем относить к пресловутым ограниченным когнитивным способностям агентов.

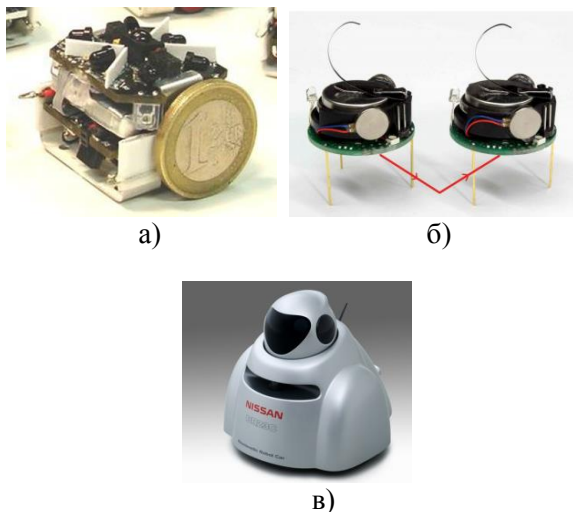


Рис. 9. а) проект SwarmRobot, б) Kilobot, в) робот EPORO

#### 4.2.2. ЦЕНТРАЛЬНАЯ НЕРВНАЯ СИСТЕМА

Нейронов надглоточного ганглия – центральная нервная система муравья (ЦНС) – насчитывается порядка полумиллиона. Брать за основу формальную модель нейрона и пытаться промоделировать ЦНС вряд ли представляется разумным. Можно изменить масштаб, рассматривая в качестве базовых элементов так называемые большие пирамидные нейроны (БПН). Эти нейроны имеют крайне сложную структуру, обладают памятью и реализуют весьма нетривиальные функции, вплоть до реализации условно-рефлекторного поведения. В [18] описывается система управления роботом, построенная на базе таких нейронов. Однако и этот уровень масштаба не является конструктивным. Дело в том, что создание такой системы управления осуществляется «вручную», а вопросы обучения и самоорганизации сети БПН (то, что является основным достоинством примитивных систем формальных нейронов) остаются пока открытыми.

**Центральные моторные программы.** Вместо моделирования целого ансамбля из 1 млн нейронов (включая нейроны ЦНС) можно реализовать ограниченное количество функциональных блоков (подсистема распознавания, ориентации, ком-

муникации, обучения, выполнения действий и т.п.). Речь идет о реализации идеи многоуровневого иерархического управления. Эта идея применительно к построению движений была сформулирована Н.А. Бернштейном еще в 30-40-е гг. прошлого века – так называемая пирамидная двигательная система [2]. По такому же принципу, используя хорошо изученный нейрофизиологами механизм центральных моторных программ, можно строить и системы управления роботами [12]. В частности, в [19] описан механизм реализации феномена импринтинга (запечатления образа) на основе так называемых U-модулей – элементов, образующих иерархию центральных моторных программ. Итак, вместо реализации всей совокупности нейронов можно обойтись моделированием целых их фрагментов и областей.

#### *4.2.3. ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОСОБИ*

Формирование коалиций, дифференциация функций, выявление лидера и образование иерархий – все это в конечном итоге подразумевает наличие различий у особей в группе. Даже в совокупности идентичных по структуре и параметрам особей должна возникнуть неоднородность, пусть и динамическая, обусловленная, например, текущими условиями внешней среды, взаимным расположением особей и т.п.

Особый интерес представляют психофизиологические различия между членами группы, такие как различия в темпераментах особей и их эмоциональной организации. Действительно, как эмоции, так и темперамент – это одни из основных механизмов оценок поведения высокоорганизованных организмов. Поэтому вполне естественен вопрос их применимости к описанию и оценке поведения технических устройств. Для успешного решения такого комплекса вопросов, как коллективное принятие решений группой роботов [62] или стайное поведение [20], необходима психологическая дифференциация роботов.

**Эмоции.** В работе [22] предлагается архитектура системы управления (СУ) роботом, реализующая механизмы эмоций в простой и естественной форме. В основе эмоциональной компоненты СУ лежит так называемая потребностно-информационная теория эмоций П.В. Симонова [43, 71]. Предполагается, что



эмоции являются оценкой текущей потребности (ее качества и ценности) и возможности ее удовлетворения. В общем виде соотношение этих факторов описывается формулой:

$$E = f(N, p(I_{need}, I_{has})),$$

где  $E$  – эмоция, ее величина, качество и знак;  $N$  – сила и качество текущей необходимости;  $p(I_{need}, I_{has})$  – оценка возможности удовлетворить потребность на базе врожденного и полученного жизненного опыта;  $I_{need}$  – информация о способе, необходимом для удовлетворения потребности;  $I_{has}$  – информация об имеющихся у субъекта ресурсах. Индивидуум оценивает свои текущие потребности  $I_{need}$ , или то, что он должен сделать в текущей ситуации (поесть, найти еду, уклониться от препятствия, убежать и т.д.). Затем он оценивает возможности удовлетворения этих потребностей  $I_{has}$ . Разность между  $I_{need}$ , и  $I_{has}$  определяет эмоциональную оценку текущей ситуации.

В основе эмоциональной СУ лежит гибридная нейропродукционная система. С технической стороны эмоции определяют *положительную обратную связь* в контуре управления. Для каждого действия  $a_i$ , которое может совершить робот, вычисляется его частная эмоциональная оценка

$$(1) E_i = N_i(a_i - a_i^{actual}).$$

Здесь  $N_i$  – величина потребности, связанная с действием, а  $a_i^{actual}$  – актуально выполняемое действие. Полной оценкой эмоционального состояния робота является сумма

$$E = \sum_{i=1}^n E_i .$$

Влияние эмоций на совершение действия реализуется как положительная обратная связь между выходным сигналом (текущее действие) и поведенческими правилами.

Серия проведенных экспериментов показала:

1. Эмоции являются естественным индикатором состояния робота. Более того, в некотором смысле эмоции могут определить критерии обучения робота, его целевую функцию и пр., предположив, например, что основная поведенческая задача – в уменьшении негативных эмоций.

2. Эмоции контрастируют сенсорное восприятие и стабилизируют поведение робота, т.е. можно говорить об эмоциональных фильтрах – как входном, сенсорном, так и выходном, эффекторном.
3. Роль эмоций в состоянии неполноты информации является основной.

Было показано, что положительные эмоции стабилизируют поведение робота. В некотором смысле они частично отвечают за реализацию механизма кратковременной памяти. Имеется в виду, что положительная обратная связь поддерживает значение выходных сигналов и после того, как перестает поступать входной сигнал от рецепторов. Отрицательные эмоции усиливают и контрастируют восприятие робота. Они отвечают за инициацию поисковых процедур.

Итак, эмоции являются чрезвычайно важным механизмом определения стиля и манеры поведения. Механизм эмоций обеспечивает оценку текущей ситуации и принятие решений. Этот механизм является «физиологическим слоем» в системе управления робота [55].

**Темперамент.** С точки зрения психологии, темперамент – это одна из возможных систем для оценки психологических особенностей поведения человека и высших млекопитающих и принадлежит к более высокому уровню управления, чем эмоции.

В [22] была предложена модель, согласно которой поведенческие реакции описаны двумя факторами: силой и балансом нервных процессов возбуждения и торможения. При этом торможение и возбуждение рассматриваются как параметры (значение и направление) обратной связи в системе управления робота. Этот подход близок к подходу брайтенбергских «тормозящих элементов» [56], которые противодействуют сигналам возбуждения, приходящим на пороговые элементы устройств с других (внешних) источников.

Эксперименты по реализации эмоционально-темпераментного поведения проводились на мобильных роботах, решающих следующую задачу. Пусть робот «любит» темные места и «боится» ярко освещенных мест, имеет потребность в «пище» и старается избегать столкновений с препятствиями.

Робот был оснащен несколькими датчиками: сенсором «пищи» (детектором черного пятна на полу), инфракрасным датчиком для определения расстояний до препятствий, бампером (датчик столкновений), светочувствительным датчиком и внутренним (виртуальным) датчиком голода.

Робот имел набор потребностей: потребность в пище, в безопасности (он «боится» столкновений), потребность в комфорте («любит» темные места и «не любит» свет). Когда робот находится в темноте и не голоден, он «спит».

Робот был оснащен «Регулятором темперамента», состоящим из двух частей: регуляторами «Возбуждение» и «Торможение». Значения параметров возбуждения и торможения определялись позициями этих регуляторов. Например, когда регулятор «Торможение» установлен в максимальную позицию, а регулятор «Возбуждение» – в минимальную, робот становится флегматиком. Внешний вид робота представлен на рис. 10.

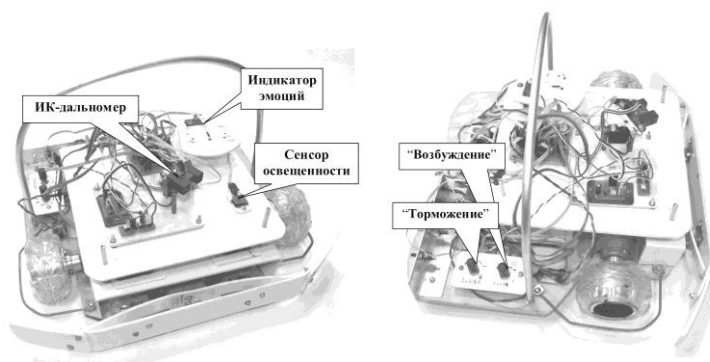


Рис. 10. «Темпераментный» мобильный робот TR-12

Основным методом для определения состояния и оценки поведения робота были длительные наблюдения. Иногда было ясно видно, что поведение робота становилось нервным (как у холерика), иногда его поведение было очевидно заторможенным, но были сложности в идентификации различий между поведением сангвиника и флегматика. Большой интерес представляли средние значения эмоций как функций от параметров возбуждения и торможения. Робот-холерик в основном имел

достаточно сильные и определенно негативные эмоции. Его поведение было очень «раздраженным» (неврастеничным), робот активно реагировал на малейшие раздражители. Робот-сангвиник также испытывал в основном отрицательные эмоции, но более слабые. Его поведение было достаточно адекватным по отношению к внешним условиям окружающей среды. Робот-флегматик по большей части испытывал положительные эмоции, но его поведение было несколько заторможенным. Поведение робота-меланхолика с низкими уровнями возбуждения и торможения было совершенно неинтересным. Большую часть времени робот стоял и «отдыхал», только изредка отправляясь на поиски пищи. У него превалировали отрицательные эмоции.

В тех же работах [22] была рассмотрена формализация понятия «темперамент» на основе конечно-автоматных моделей. Например, меланхоличный характер хорошо описывается автоматом с линейной тактикой  $L_{fn,f}$ , сангвиник – «доверчивым» автоматом  $D_{fn,f}$  и т.п. Кроме того, были определены параметры сред, наиболее благоприятных для различных типов темпераментов. Предложенная автоматная модель темперамента является в некотором смысле оценочной, она позволяет определять основные, качественные и количественные параметры состава группы роботов для коллективного решения комплексных задач.

С содержательной, качественной точки зрения это может выглядеть так. Зачастую успешное решение задачи требует группы роботов с различной физиологической организацией: меланхолическими, холерическими, сангвинистическими и флегматичными роботами. Один робот быстро принимает решения, а другой глубоко анализирует; один быстро реагирует на изменения окружающей среды, а другой характеризуется стабильностью и терпением. Это особенно важно в случае сложной окружающей среды с неопределенными или неизвестными свойствами, где специфические черты поведения роботов выходят на первый план. В первую очередь, это проблема особенности реакция роботов на внешние раздражители. Эти аспекты удобно описываются в терминах эмоций и темперамента.

Итак, если эмоции являются «физиологическим слоем» в системе управления робота, то темперамент как постоянный,

«психический» уровень, определяет эмоциональные параметры – коэффициенты возбуждения и торможения.

#### *4.2.4. САМОСОЗНАНИЕ И СУБЪЕКТИВНОЕ «Я»*

Считается, что эффективность решения задач организмом (агентом, роботом, животным) зависит от степени его – животного – организации. С другой стороны, общепринято, что интеллектуальная система (высокоразвитый агент) должна содержать модель мира, как внутреннего, так и внешнего. И анализ, и принятие решений, и формирование управляющих воздействий – все это определяется в соответствии с этой моделью. Кроме того, именно эта модель отвечает за процедуру прогнозирования развития ситуации, а также позволяет интеллектуальной системе работать в условиях неполноты информации о среде обитания. С понятием модели мира теснейшим образом связано то, что называется самосознанием или субъективным Я (С.Я.). Без наличия С.Я. модель мира теряет смысл.

Несмотря на то, что модель мира, включающая С.Я., – это прерогатива сложной, интеллектуальной системы, в [20] описана возможность реализации модели мира и механизмов С.Я. простыми средствами, допускающими их воплощение на базе агентов с ограниченными когнитивными способностями, т.е. на весьма скромном программно-аппаратном уровне.

**Модели мира и С.Я.** Будем рассматривать С.Я. как компоненту модели, описывающей отношения между объектами окружающего мира. Модель мира, согласно [1], – это способ отображения в памяти интеллектуальной системы знаний о внешней среде. Предположим, что эти знания сводимы к описанию отношений между объектами мира, в котором живет робот. Далее, будем полагать, что всякое действие робота должно быть отображено в модели мира. При этом, когда совершается некое действие, происходит изменение отношений между объектами. Одним из объектов является сам робот. Этот объект как компонента модели, с которой работает система управления, и есть то, можно назвать С.Я. В работе [41] приводится пример организации системы управления четырехногого робота, которая пользовалась некоторой внутренней моделью самого себя. В случае повреждения ноги модель подстраивалась к изменившимся

условиям. Причем все это, согласно [41], рассматривалось как сознание субъективной реальности.

Далее приводится иной механизм, описывающий эти понятия. Пусть для робота окружающий мир в некоторый момент времени  $t$  описывается отношением  $R(t)$  между его датчиками и наблюдаемыми объектами (например, отношение «видеть», «детектировать» и т.п.). Когда робот совершает какое-нибудь действие, наблюдаемая картина мира, естественно, меняется, т.е. изменяются отношения между датчиками робота и объектами. Изменения этих отношений можно описать не с точки зрения «объект – датчик», а с точки зрения лишь датчиков, т.е. с точки зрения робота. Это означает, что некоторому действию  $a$  будет соответствовать матричный оператор  $M_a$ . Смысл элемента матрицы  $m_{ij}$  таков: то, что наблюдалось датчиком  $i$ , при выполнении действия  $r$  (например, поворот, движение и т.п.) будет наблюдаться датчиком  $j$ . Строки и столбцы соответствуют датчикам робота, а элементы  $m_{ij}$  в простейшем случае представляют собой числа. Если речь идет об измерениях, то элементы  $m_{ij}$  будут некими величинами, определяющим то, насколько значения датчиков изменятся при шаге вперед.

Итак, если в момент времени  $t$  наблюдаемая картина мира описывается отношением  $R(t)$ , то, совершая действие  $M_a$ , наблюдаемая картина изменится следующим образом:

$$(2) R(t + 1) = M_a^T R(t).$$

Используя последовательность преобразований начальной ситуации  $R$ , можно определить состояние робота, совершающего соответствующие действия. Все это внешне похоже на последовательности преобразования координат при геометрических построениях, однако здесь мы имеем дело с некоторой точкой отсчета, связанной с самим роботом – с тем самым субъективным Я.

**Работа с моделью.** В предлагаемой модели мира С.Я. фигурирует неявно. Смысл С.Я. с точки зрения робота заключается в том, что «Я», как элемент модели мира, должно использоваться для *прогнозирования* ситуации. Это прогнозирование рассматривается в самом общем смысле и сводится к *моделированию* развития ситуации.

В основе процедуры прогнозирования лежит оценка текущей ситуации

$$(3) \mu(R(t+n), C(t)),$$

где  $n$  – глубина прогноза, а  $C(t)$  – некий текущий контекст, в рамках которого и происходит оценка ситуации. Например, для «жертвы» оценка зависит от того, сколько вокруг нее «охотников», а «охотнику» хорошо тогда, когда рядом находится «жертва» и т.п. С практической точки зрения мы имеем следующую последовательность: робот получает информацию от своих сенсоров и формирует описание текущей ситуации в виде отношения  $R(t)$ . Далее, согласно (2), перебираются все возможные действия на  $n$  шагов в глубину. Результирующее (прогнозируемое) отношение  $R(t+n)$  оценивается. Исходя из результатов оценки (3) окончательно выбирается действие, приводящее к наиболее благоприятному исходу.

Итак, у нас есть особь, обладающая психофизиологическими особенностями, использующая модель мира и осознающая себя (субъективное Я). Кроме того, рассмотренный механизм центральных моторных программ позволяет реализовывать достаточно сложные поведенческие функции удобным с технической точки зрения способом. На этом мы закончим рассмотрение вопросов индивидуальной организации, полагая, что описанные выше феномены высшей нервной деятельности и механизмы их реализации образуют необходимый базис для построения моделей социального поведения.

Здесь следует сделать важное замечание. Разумеется, большей частью термин «муравей» должен рассматриваться в метафорическом смысле. Вряд ли было бы правомерно говорить о непосредственном применении рассмотренных механизмов социального поведения или индивидуальной организации особи к муравью. Особенности психофизиологической организации, теории эмоций, механизмы поведения и пр. – это результат изучения прежде всего позвоночных. Вряд ли та же информационная теория эмоций В.П. Симонова или рассуждения о механизмах типизации характера, апеллирующие к организации высших млекопитающих, так же пригодны для мира насекомых. В этом смысле муравей, как конечная цель исследования – это своего рода химера, т.е. искусственный объект, созданный из

моделей-фрагментов, описывающих или относящихся к совершенно иным живым существам. Большей частью это обусловлено тем, что выбирались наиболее удобные для изучения и, главное, для технической реализации модели и методы. Поэтому одной из задач настоящего исследования является определение того, будет ли такая химера, метафорический муравей (точнее – колония) жизнеспособен с технической точки зрения.

### *4.3. МЕХАНИЗМЫ СОЦИАЛЬНОГО ПОВЕДЕНИЯ*

Прежде чем приступить к рассмотрению механизмов, обуславливающих социальное поведение, сделаем важное замечание: взаимодействие между членами группы должно иметь локальный характер.

#### *4.3.1. ЛОКАЛЬНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ*

Одной из принципиальных особенностей роевой робототехники является локальный характер взаимодействия роботов друг с другом, а также роботов со средой [70]. Важнейшим видом взаимодействия является коммуникация. При этом коммуникация может быть как явной в виде непосредственного обмена сообщениями между агентами, так и неявной (*implicit communication*) [73]. Примеры неявной коммуникации – это наблюдение друг за другом, оставление знака, который может быть найден и опознан другими (феромонный след) и пр. В любом случае нас интересует, прежде всего, ситуация, когда каждый робот группы непосредственно взаимодействует лишь со своими соседями, находящимися в некоторой ограниченной зоне видимости. Отсюда обычно следует, что в такой системе роботы самостоятельно принимают решения о дальнейших действиях, опираясь на некоторые простые правила локального взаимодействия. Правила локального взаимодействия могут быть самыми разными. От сугубо формальных [35] до весьма экзотических. Например, в [59] правила стайного движения основаны на модели пружин и амортизаторов. «Пружинная» составляющая модели определяет притяжение особей к лидеру (а не друг к другу, что характерно), а «амортизационная» – отталкивание от лидера.



В этой работе мы будем рассматривать прежде всего механизмы локального взаимодействия, основанные на том, что агенты могут обмениваться сигналами (сообщениями) с другими особями, находящимися в непосредственной близости. Это – понимание локальности в непосредственном, узком смысле. На самом деле понятие локального взаимодействия может трактоваться более широко, как общий подход к решению задач, см., например, [47].

#### 4.3.2. СТАТИЧЕСКИЙ РОЙ КАК ФОРМАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ

Одной из моделей, описывающих организацию множества локально взаимодействующих агентов или роботов, является так называемый *статический рой*. Статический рой характеризуется отсутствием заданного управляющего центра и представляет собой некую фиксированную в данный момент времени сеть – совокупность агентов [21]. Основные свойства статического роя – это активность, локальность взаимодействия и функциональная неоднородность.

**Активность.** В отличие от вычислительной сети, сеть агентов должна быть способна к восприятию сигналов внешней среды, а также к совершению некоторых (например, двигательных) функций, т.е. оказывать влияние на внешний мир.

**Локальность взаимодействия.** Статический рой – система с принципиально локальным характером взаимодействия: агенты обмениваются информацией лишь со своими соседями.

**Функциональная неоднородность.** Решение сложных задач (т.е. проявление эмерджентных свойств системы) предполагает наличие неоднородности в группе. Это означает наличие дифференциации выполняемых агентами функций: стратегическое и тактическое управление, сбор и обработка информации, реализация эффекторных функций и т.п.

Считается, что агенты имеют фиксированное число коммуникационных портов – точек контакта, позволяющим им устанавливать каналы обмена информацией. На Рис. 11 изображен пример статического роя в виде сети взаимодействующих агентов.

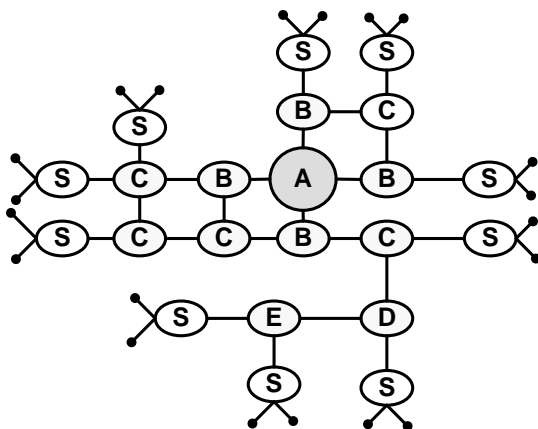


Рис. 11. Пример организации сети

Здесь узел *A* является управляющим центром, его ближайшие соседи (*B*) – анализаторы информации, подготавливающие ее для принятия решения, а периферийные узлы (*S*) отвечают за внешнюю сенсорику (сбор информации).

Для статического роля разработан ряд методов, реализующих задачи хранения информации и организации запросов к ней, выполнения согласованных двигательных функций и пр., см. [21]. Более того, в работе [7] показана принципиальная возможность организации логического вывода на множестве агентов с локальной организацией связей. В основе такого вывода лежит процедура поиска в ширину, позволяющая решать задачи категории исчисления высказываний.

Предполагается, что агенты – элементы статического роля – хранят множество утверждений  $c_i$ , которые могут рассматриваться либо как факты, либо как логические выражения, импликации вида

$$(4) \quad c_1 \& c_2 \& \dots c_n \rightarrow f.$$

Эти множества утверждений образуют базы данных (БД) агентов. Пусть некий иницирующий узел пытается обработать интересное его правило вида (4). Этот иницирующий узел будет поочередно отправлять в сеть запросы на определение истинности конъюнктов этого правила. Прочие узлы сети будут

искать в своих БД интересующие инициатора данные, которые могут быть либо фактами, либо правыми частями неких хранящихся в узлах правил. На Рис. 12 изображен фрагмент процесса распространения запроса в сети.

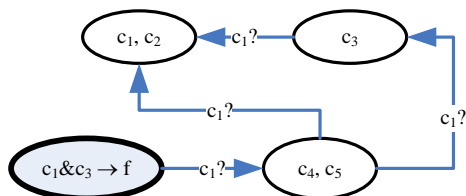


Рис. 12. Запрос конъюнкта  $c_1$

Здесь иницирующий узел отправляет запрос  $c_1$  для доказательства утверждения  $c_1 \& c_3 \rightarrow f$ .

Важно, что во всех описанных выше задачах одним из ключевых вопросов организации статического роя является то, каким образом узлы-агенты выбирают лидера – центральный, главный или иницирующий узел.

#### 4.3.3. ПРОБЛЕМА ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЛИДЕРА В ГРУППЕ

В подавляющем числе работ в области роевой робототехники предполагается априори заданный лидер. При этом чаще всего этот лидер задает движение роя. Вообще, подавляющее число примеров решения задач в области роевой робототехники касается именно согласованного движения роя. В [70] эта очевидная и достаточно простая задача выделена как метод «Следование за лидером» – «Leader-Follower Method».

Значительно реже лидер определяется, исходя из иных, не априорных соображений. Например, в [10] описывается динамическое выделение агентов-координаторов (лидеров), основанное на «геометрических» построениях – лидерами групп становятся роботы, ближе всех расположенные к месту проведения неких технологических действий. В [40, 41] рассмотрена общая схема формирования сознания «вожака», связанная с формированием коллектива роботов. Здесь предполагается существование у робота субъективного Я, сопровождаемого стремлением стать вождем. Этот «вожак» может появиться в

коллективе (стае) практически одинаковых роботов. При этом если «вожак» погибает, то в стае появляется новый «вожак». Подразумевается, что в такой стае смена лидера определяется психологией животных. Подобные психологические эффекты описаны, например, в [25]. Однако нас здесь интересуют такие методы определения лидера, которые основаны на локальном взаимодействии между особями.

**Выделение доминанта.** В [20] описан сугубо технический прием, позволяющий определить лидера для решения задачи согласованной стайной охоты. Для каждой особи определены правила поведения, среди которых имеются такие, как «Если обнаружена жертва, то преследовать ее», «Если жертва не видна, то идти к соседу» (правило «Держаться вместе»). Последнее правило подразумевает, что охота группой эффективнее, нежели индивидуальная. Проблема в том, что в отсутствии жертвы охотники будут просто образовывать почти неподвижные скопления. Здесь-то и нужен лидер, который поведет стаю за собой. Предложенный метод заключается в том, что когда образуется связанная коммуникационными каналами группа, то члены группы оценивают «вес» своих соседей и сравнивают со своим. В том случае, когда вес некоторой особи оказывается выше весов своих соседей (он – самый «сильный»), то эта особь становится лидером и просто не придерживается правила «Держаться вместе». Он начинает свободный поиск, а все остальные следуют за ним.

Проводя аналогию с моделями социальной организации, мы в этой ситуации имеем дело с анонимным сообществом, в котором, в зависимости от ситуации, формируется временный лидер, определяющий движение группы. Это и есть выделение доминанта, т.е. такой особи, которая в своем поведении не ориентируется на других особей, а остальные, напротив, на неё ориентируются.

Отметим здесь, что рой при такой организации превращается в стаю – стая характеризуется именно наличием лидера (доминанта), за которым следуют остальные роботы (если понимать стаю как индивидуализированное сообщество, построенное по принципу лидерства).

**Выбор лидера в статическом рое.** В работах [63, 64] описана задача выявления лидера в более общем случае, с точки зрения механизмов локального информационного обмена между агентами.

Предполагается, что имеется множество агентов с ограниченными коммуникационными возможностями, т.е. эти агенты способны лишь к непосредственному локальному взаимодействию между соседями. Задача состоит в том, чтобы агенты выбрали единственного лидера путем голосования. При этом топология сети заранее неизвестна и все рассуждения должны носить сугубо «локальный» характер, т.е. идти от имени агента, принимающего участие в голосовании.

Каждый агент описывается четверкой

$$A = (\alpha, L, C, W),$$

где  $\alpha$  – идентификатор или имя агента;  $L$  – список агентов-соседей, от которых агент может получать информацию (входящие дуги);  $C$  – идентификатор «кандидата», за которого голосует агент  $\alpha$ ;  $W$  – вес кандидата  $C$ , т.е. число голосов, которое, по мнению агента, следует отдать за кандидата.

Суть процедуры голосования заключается в том, что каждый агент определяет, за кого голосуют его соседи. При этом в зависимости от веса кандидата, за которого голосует сосед, агент может поменять свое мнение и проголосовать за того же кандидата, что и его сосед.

Предположим, что агент  $a$  голосует за кандидата  $C_a$ , а агент  $c$  – за кандидата  $C_c$ . Если вес  $W_a$  окажется меньше веса  $W_c$ , то агент  $a$  может поменять свое мнение и переголосовать. При этом к весу нового кандидата будет добавлен еще один голос. Вероятность того, что агент  $i$  изменит свое мнение под влиянием мнения агента  $j$  (оппонента), может быть определена так:

$$P_{ij} = \frac{W_i}{W_i + W_j}.$$

Таким образом, склонность к перемене своего мнения естественным образом зависит от степени убежденности (или веса) кандидата. В приведенных выше работах показано, что такая процедура голосования сходится в практически значимом коли-

честве экспериментов с различными топологиями статического роя, т.е. заканчивается выбором единственного агента – лидера.

#### 4.3.4. ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ ФУНКЦИЙ

Специализация (разделение функций или феномен ролей) в роевой робототехнике сводится к так называемому распределению задач между агентами. Это одно из наиболее проблемных мест роевой робототехники. В упомянутых обзорах [70] и [73] распределение задач в коллективе роботов рассматривается лишь декларативно. В лучшем случае упоминаются некоторые физические модели, методы распределенного планирования, оптимизации и прочие общие механизмы (см, например, [17]). Причиной этому является то, что дифференциация функций и распределение задач не рассматривается роевой робототехникой как актуальная проблема. Полагается, что рой должен решать лишь простые, массовые задачи типа согласованного движения, а это несомненно противоречит декларируемым представлениям об общности и сложности задач, которые могут решаться группой роботов.

Рассмотрим далее, как решается эта задача в статическом рое.

**Распределение задач в статическом рое.** При отсутствии морфологических различий между агентами распределение ролей в статическом рое определяется исключительно текущей топологией системы. В работах [63, 64] описана простая процедура распределения ролей (задач), основанная на известной процедуре распространения волны управления. Важно, что инициатором распространения является лидер.

Обозначим его роль, как  $R_0$ . Непосредственные соседи лидера («ближний круг») получают от него иницирующий пакет, согласно которому им назначается роль  $R_1$  и т.д. Таким образом, роль  $i$ -го робота (агента) определяется ролями его окружения:

$$R_i = \max_{k \in Z_i} R_k + 1.$$

Здесь  $Z_i$  – это множество соседей  $i$ -го робота. Подчеркнем, что волновое распределение ролей реализуется исключительно локальным взаимодействием. В качестве примера в работе [64] описана процедура распределения ролей для решения задачи

стаиной охоты. В ней лидер стаи назначает роли загонщикам для совершения маневра окружения жертвы.

#### 4.3.5. ОБРАЗОВАНИЕ КОАЛИЦИЙ

Одним из базовых механизмов социального поведения является образование коалиций. В простейшем случае коалиции образуют агенты (роботы), которые могут объединять свои ресурсы для решения сложных задач. В общем же случае коллективная коалиционная организация характеризуется тем, что члены группы выполняют некоторую согласованную работу и имеют некую общую цель.

Здесь следует отметить, что в рассматриваемых ниже работах механизмы образования коалиций не основаны на локальном взаимодействии агентов – особи имеют полную информацию о состоянии системы. Однако рассмотренные выше механизмы информационного обмена в группе роботов, образующей статический рой, достаточно естественным образом могут быть применены и к задаче образования коалиций.

**Кооперации на основе критериев взаимной полезности.** В работах А.А. Кулинича [26, 27, 28] рассмотрена модель формирования коалиций, как кооперации агентов на основе критериев взаимной полезности и когнитивного диссонанса. В качестве математической модели системы использовалась модель представления экспертных знаний о процессах в динамической системе в виде качественной когнитивной карты. В когнитивной карте определено множество факторов ситуации  $F = \{f_i\}$ , упорядоченное множество лингвистических значений факторов  $L_i = \{l_{ij}\}$  и причинно-следственные отношения между факторами  $W$ . Динамика изменения факторов ситуации в когнитивной карте задается системой конечно-разностных логико-лингвистических уравнений

$$Y(t + 1) = W \circ Y(t),$$

где  $Y(t)$  – состояние ситуации,  $W$  – система правил «если, то», заданная на множестве всех возможных значений факторов ситуации  $W$ . При этом прогноз развития ситуации  $Y_q(n)$  для каждого агента строится с учетом противодействия противников [26].

Кроме того, были определены необходимые и достаточные условия образования коалиции, основанные на оценке взаимной полезности агентов, точно так, как это представлено в теории социального поведения субъектов [52]. При этом наличие дисбаланса взаимной полезности или эффективности агентов, включенных в коалицию, приводит к возникновению скрытых (латентных) конфликтов в коалиции и появлению когнитивного диссонанса. Именно когнитивный диссонанс является движущей силой для изменения структуры коалиции и/или изменения поведения агента.

Интересно, что в качестве примера системы, реализующей образование коалиций, был выбран виртуальный футбол. При анализе когнитивного диссонанса по эффективности агентов считается, что агенты получают вознаграждение пропорционально их результативности (забитые голы). Эффективность агента определится из соотношения

$$E(a_i) = \frac{\sum_{t=1, \dots, n} r_3(a_i, t)}{\sum_{\substack{t=1, \dots, n \\ i=1, \dots, N/2}} r_3(a_i, t)},$$

где в числителе число голов, забитых игроком  $a_i$  за период времени  $t = 1, \dots, n$ ; в знаменателе – общее число голов, забитых игроками команды.

Агенты с неравной эффективностью характеризуются когнитивным диссонансом по эффективности и могут изменять свое поведение, изменения правила выбора агента на основе полезности агента партнера. Моделирование поведения агентов показало, что индивидуальные отличия агентов по скорости перемещения создают условия самоорганизации в команде. Так, в командах появляются агенты, выполняющие разные задачи – «нападающие» и «защитники». В определенном смысле можно сказать, что образование коалиций в качестве некоторого «побочного» эффекта приводит к реализации механизма дифференциации функций, т.е. специализации в социуме.

**Автоматная модель.** Рассмотрим задачу, связанную с разделением труда. Речь идет о ситуации, когда имеется некоторая сложная задача, состоящая из множества различных по своему



характеру подзадач. Причем для выполнения этих подзадач одни агенты являются более приспособленными, а другие – менее. Скажем, в зависимости от их – агентов – индивидуальных особенностей. Вопрос заключается в том, как распределить множество различных по своему характеру агентов между этими задачами так, чтобы общий выигрыш был максимален, т.е. чтобы была достижима общая цель.

В [22] был рассмотрен вопрос о применимости автоматных моделей к описанию коллективного поведения группы различных по своему поведению автоматов (роботов, агентов). При такой постановке эта задача сводится к некоторой игре в размещения. Пусть имеются  $m$  кормушек, каждой из которых соответствует своя среда, и множество одинаковых автоматов  $A_i$ . Тогда мы имеем задачу распределения автоматов  $A_i$  по кормушкам с максимизацией общего выигрыша (игра с общей кассой), которая была решена М.Л. Цетлиным и его последователями [53].

Нас же интересует неоднородная группа агентов (автоматов). Предположим, что разные агенты по-разному ведут себя в этих средах, т.е. для каждого агента, в зависимости от его характеристики, можно определить, наиболее благоприятную для него среду. Каждая среда – это своя задача. Пусть имеется множество игроков – автоматов  $A_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ . В отличие от [53] зададим игру в виде множества  $E = \{E_1, E_2, \dots, E_m\}$ , где каждый элемент множества представляет собой пару  $E_i = (C_i, w_i)$ . Здесь  $C_i$  – составная среда, а величина  $w_i$  – это так называемая мощность среды, т.е. некий ресурс, который будет делиться между игроками, выбравшими эту стратегию  $i$  (ресурс кормушки).

Будем полагать, что  $n > m$ . Каждый автомат в каждый момент времени работает в какой-либо из этих сред (погружен в среду или настроен на нее). Причем в среде  $E_i$  может находиться несколько автоматов. Очевидно, что выигрыш автомата зависит не только от выбранной им среды, но и от того, насколько каждый автомат эффективен в этой среде, т.е. от того, насколько автомат соответствует ей. Игра заключается в распределении автоматов по средам  $E_i$  так, чтобы максимизировать общий выигрыш. Это – типичная игра с общей кассой. Она весьма

созвучна задаче М.Л. Цетлина и С.Л. Гинзбурга о распределении вычислительных ресурсов, однако в [53] подразумевалось, что среда  $E = \{C_1, C_2, \dots, C_m\}$ , т.е. представляет собой составную среду.

Предложенного формализма достаточно для того, чтобы получить численное решение задачи о распределении автоматов по кормушкам, которые представлены составными средами. То есть решить задачу распределения ролей между агентами.

Рассмотренные выше модели образования коалиций являются одними из фундаментальных механизмов организации социальных сообществ. Здесь важным обстоятельством является то, что мы рассматриваем именно некие базовые механизмы, лежащие в основе тех или иных внешних, поведенческих феноменов. При этом следует различать моделирование базового механизма и его внешнего проявления, т.е. поведения. Это различие, однако, не всегда очевидно, поэтому рассмотрим далее несколько более детально этот вопрос.

#### *4.3.6. ИМИТАЦИЯ ЧАСТНЫХ ФЕНОМЕНОВ ГРУППОВОГО ПОВЕДЕНИЯ*

Судя по многочисленным публикациям, складывается впечатление, что на данный момент успешно реализован ряд отдельных групповых поведенческих феноменов, которые могли бы лечь в основу схемы на Рис. 8, т.е. моделей и методов реализации социального поведения. Речь идет, прежде всего, о задачах согласованного движения и рекогносцировки. Среди одних из первых реальных проектов в этой области можно отметить работы 2000 года MARS (Multiple Autonomous Robots Laboratory, Пенсильванский университет) [65]. В них отработывались методы ориентации с использованием правил ближайшего соседства. При этом роботы определяли свои действия по действиям своих соседей: если в группе есть ведущий, то все остальные роботы повторяют его движения. Среди доведенных фактически до реального применения можно выделить проект фирмы Nissan – группу роботов EPORO [67]. В этом проекте реализовывалась модель поведения стаи рыб. Роботы были оснащены лазерным дальномером, имитирующим сенсор «боковая линия», и использовали «три правила поведения рыб»:

- изменять направление движения без столкновений с другими;
- двигаться бок о бок с остальными, сохраняя определённую дистанцию и скорость;
- уметь безопасно сближаться.

Следует отметить, что этот проект был связан с созданием системы управления автомобилей, умеющих двигаться в общем потоке в автоматическом режиме.

Большое количество интересных задач, решаемых роем или группой роботов, можно найти в работах открытого проекта SwarmRobot [72]. На самом деле, однако, более детальный анализ предлагаемых в этих работах способов решений показывает их непригодность для поставленной задачи, т.е. формирования базового набора механизмов для реализации социального поведения. Проблема заключается в их своего рода «безыдейности», т.е. невозможности вычленить отдельные компоненты или механизмы социального поведения. Те же модели стайного движения не подразумевают их декомпозицию на когезию, симпатическую индукцию, дифференциацию функций и т.п. Более того, в значительной части работ используются вовсе не поведенческие алгоритмы, а сугубо формальные модели и методы, реализованные в виде алгоритмов обхода препятствий и уклонения от столкновений; алгоритмов, учитывающих «отталкивание» и «притяжение» особей в группе и т.п. Задачи эти, безусловно, важны и интересны, особенно с практической точки зрения. Однако способы их решения не приближают нас к поставленной цели.

Подытожив, можно сделать вывод о том, что, вообще говоря, реализация отдельных, частных феноменов группового поведения должна осуществляться на основе явно выделенных базовых механизмов социального поведения.

#### *4.4. ЯЗЫК И ОБЩЕНИЕ*

Исследования в области языкового взаимодействия в робототехнике можно условно разделить на две основных области: а) создание языков и средств общения между человеком-оператором и роботом (создание различного рода управляющих,

командных интерфейсов) и б) создание средств общения роботов между собой. Нас, с точки зрения групповой робототехники, интересует именно второе направление.

подавляющее большинство работ в области межмашинного взаимодействия посвящено организации каналов связи между роботами. Значительно реже рассматриваются сугубо языковые аспекты общения роботов между собой. Например, в [57] представлен язык SWARMORPH-script, который позволяет описывать правила, управляющие процессом создания распределенной формы морфологии (формы) группы роботов. При этом на базе локальной коммуникации между роботами происходит обмен фразами, содержащими идентификаторы требуемых правил движения. Иной подход предложен в [36], где рассматривается задача коммуникации роботов на основе языка мультисигнальных акустических сигналов.

Так или иначе, но в основном речь идет о создании некоторого командного интерфейса, только отправителем команды может являться не только оператор, а другой робот. При этом обсуждаются главным образом задачи создания форматов сообщений и организации коммуникационных каналов. В [23] предлагается иной взгляд на проблему организации языкового общения между роботами. А именно – рассмотреть систему управления (СУ) робота как знаковую систему.

**Интерпретация знака.** Будем полагать, что система управления роботом (агентом) построена на основе семантической сети. При этом на функциональном уровне семантическая сеть представлена в виде абстрактной нейроподобной системы. Рассматривая знак как классическую триаду «имя (символ) – денотат (означаемое) – сигнификат (смысл)» (см., например, [39, 45]), и соотнося его с нейроподобной структурой СУ, естественным образом формируется механизм языкового восприятия.

*Имя* знака интерпретируется как элемент фразы входного языка. *Десигнатом* (именующее, идеализированное выражение для денотатов или концепт денотата) знака является непосредственно возбуждаемая вершина или множество вершин, а *сигнификат* может рассматриваться как комплекс вторичных возбуждений, приводящий систему в новое состояние, которое

может быть связано, в том числе, с реализацией эффекторных или поведенческих функций. На Рис. 13 представлено схематическое изображение знака (треугольник Фреге) и соответствующего фрагмента сети системы управления.

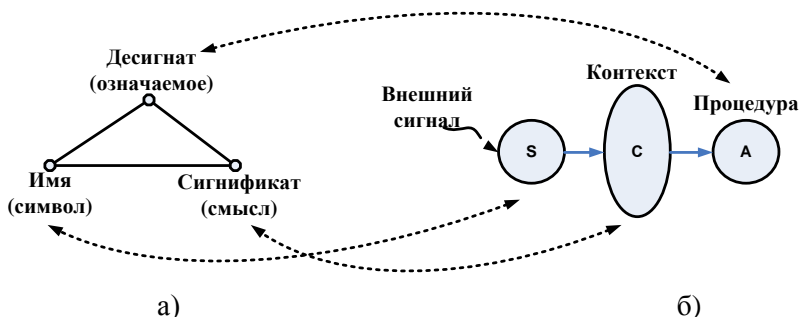


Рис. 13. а) знак; б) фрагмент сети

Здесь некий внешний сигнал  $S$  вызывает реакцию системы – выполнение процедуры  $A$ . При этом если между  $S$  и  $A$  имеется прямая связь, то мы получаем примитивную стимул-реактивную систему, в которой все рассуждения о семантике теряют смысл. Это означает, что между  $S$  и  $A$  должен существовать некий посредник, который может определять зависимости между стимулами и реакциями системы. Этот посредник и называется контекстом  $C$ . Такая интерпретация описывает устройство нижней семиотической системы.

**Структура языка.** В этой модели можно использовать предельно простой язык, в котором знаки-слова имеют только одно главное, непосредственное значение. Более того, фразы языка представлены множествами слов-символов, не образующих грамматических структур.

**Восприятие языка.** Предполагается, что множество входных символов непосредственно возбуждает именуемые ими вершины семантической сети (в силу того, что десигнат входного символа определяет вершину или множество вершин сети).

Пусть внешняя фраза представляет собой множество из одного элемента (символа) «Опасность». Этот символ восприни-

мается единственным элементом сети – соответствующей вершиной-вентилем «Опасность», см. Рис. 14.

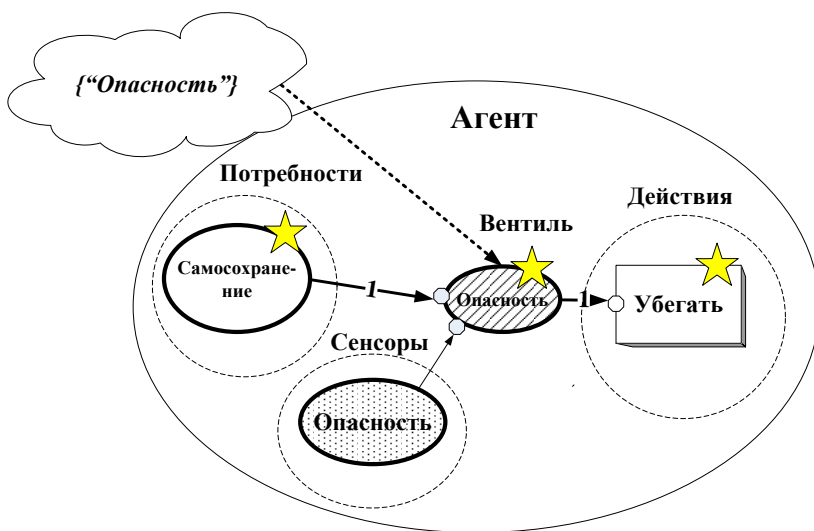


Рис. 14. Восприятие символа агентом

Возбуждение вентилья приводит к активизации действия «Убегать». При этом для системы, вообще говоря, важно лишь появление возбужденной вершины, а что присело ее в возбуждение – сенсорный сигнал или фраза – несущественно.

**Порождение фраз.** Генерация фраз – это более сложное явление. Будем полагать, что инициатором генерируемого языкового сообщения является комплекс неудовлетворенных потребностей системы. Иными словами, на базовом уровне система сообщает об имеющихся потребностях, генерируя фразы в виде множества символов, как имен соответствующих вершин-десигнатов. При этом важно, что языковая инициация, определяемая актуальными потребностями агента (робота), непосредственно связана с реализацией *эмоциональной компоненты системы управления*. На Рис. 15. приведен тот же фрагмент СУ. В силу имеющихся потребностей и сигнала от сенсора, вентиль

«Опасность» находится в возбужденном состоянии и является генератором символа «Опасность».

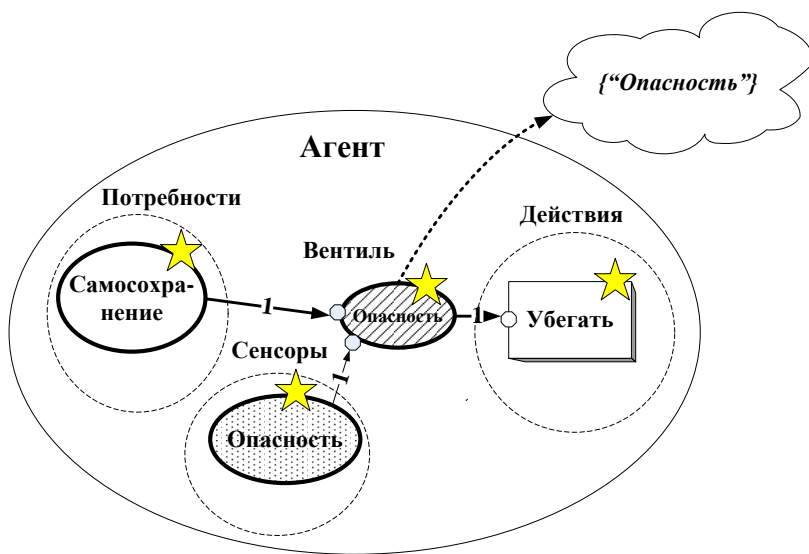


Рис. 15. Генерация символа

**Эмоции и речь.** Будем считать, что выходной символ порождается вентилем, у которого значение частной эмоции (3) минимально (самая большая отрицательная эмоция). Иными словами, система начинает генерировать фразы, связанные с неудовлетворенными потребностями. Это, по крайней мере, не противоречит как интуитивным представлениям, так и наблюдениям этологического характера. Например, в классической этологии рассматриваются «фиксированные моторные координации» (fixed action patterns), которые в сфере коммуникации играют роль ключевых «знаковых стимулов» (sign stimuli). Эти предъявляемые субъектом знаковые стимулы активируют врожденную программу реагирования другой особи-коммуниканта, вызывая у нее соответствующий ситуации и полученному сигналу «фиксированный комплекс действий» [37, 38].

Проведенные вычислительные эксперименты показали, что робот действительно начинает «говорить», когда он испытывает наибольшие отрицательные эмоции.

**Язык и контагиозное поведение.** Напомним, что примером контагиозного поведения является действие сигнала тревоги, заставляющего всю группу обратиться в бегство. Более того, контагиозное поведение может рассматриваться как пример более общего феномена подражательного поведения.

Пусть в семантической сети системы управления имеется вершина «опасность», возбуждаемая неким комплексом иных, в том числе сенсорных, вершин. Агент-инициатор, получив сигнал опасности, в течение некоторого промежутка времени будет испытывать отрицательные эмоции (в силу цепочки «получен сигнал – надо убежать – опасность еще близка»). Это приведет к тому, что будет сгенерирована (выдана вовне) фраза, содержащая символ «Опасность». Остальные члены группы воспринимают этот сигнал. Происходит внешняя инициация вершины «опасность» соответствующих сетей (хотя соответствующие входные сенсорные вершины не возбуждены). Далее возбуждение передается на связанные с вершиной «опасность» элементы, что в конечном итоге приведет к выполнению тех или иных двигательных функций. Эти ситуация приведена на Рис. 16.

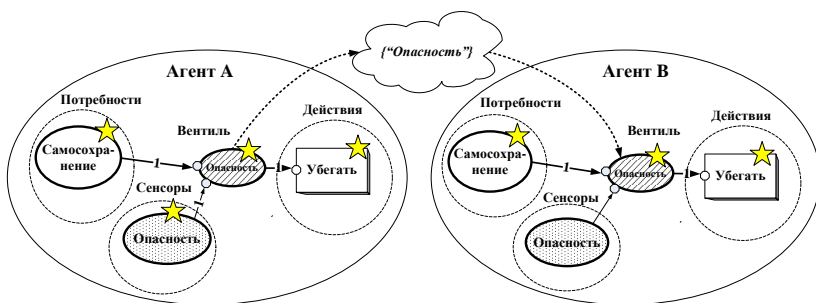


Рис. 16. Генерация и восприятие фразы

Здесь агент-инициатор **A** формирует фразу {«Опасность»}. Фраза воспринимается агентом-реципиентом **B**, при этом у реципиента **B** вентиль «Опасность» возбуждается при отсут-



ствии подтверждающего сигнала от соответствующего сенсора. Далее реципиент **B** выполняет действие «Убегать».

Как видно, при такой языковой организации подражательное поведение формируется самым естественным образом.

**Характеристики информационного канала.** Основными интересующими нас характеристиками информационного канала являются его *направленность* и *пропускная способность*. Направленность определяет такие свойства канала, как адресность сообщений, локальность и геометрия распространения сигнала. Подавляющее большинство моделей групповой робототехники подразумевает именно локальный характер взаимодействия. Например, в [68] приводится обоснование преимуществ направленной локальной коммуникации на примерах различных задач, от задачи фуражирования до «иди ко мне». В рассмотренной схеме знак-ориентированной СУ локальность и геометрическая направленность канала определяется лишь способами его физической реализации. *Пропускная способность канала* – это более интересный аспект. Рассмотренный принцип организации знак-ориентированной системы позволяет объяснить малую скорость обмена сообщениями (знаками), наблюдаемой в живой природе. Если знак воздействует на вершину десигнат, как некий возбуждающий сигнал, то скорость или частота этого воздействия должна быть соизмерима с медленными процессами распространения возбуждений в семантической (у агентов) или нейронной (у биологических объектов) сети. В этом плане можно решить и обратную задачу – определить скорость мыслительных процессов, исходя из пропускной способности канала.

**Аналоговые сигналы.** Интересным представляется такой аспект организации канала, как вид сигнала – аналоговый и дискретный (цифровой). В работе И.П. Карповой [24] рассмотрен вопрос реализации аналогового представления сигналов при локальном взаимодействии. Это позволило рассматривать передаваемые сообщения как нечеткие величины. Использование нечеткости позволило значительно увеличить надежность коммуникаций по сравнению с цифровым представлением. Это объясняется тем, что фактически использование аналоговой

нечеткой формы сигнала приводит к расширению алфавита языка общения.

Вычислительные эксперименты проводились на модели «хищник – жертва», в которой «жертвы» обменивались разными по интенсивности предупреждающими сигналами типа «опасность» или призывами о помощи. Было показано, что аналоговая форма передаваемых сигналов и реализация соответствующего механизма реакции на них повышают эффективность деятельности группы роботов с точки зрения обобщенного, энергетического критерия.

## **5. Заключение**

Утверждение о скромности успехов современной групповой робототехники, центр тяжести которой явно тяготеет к задачам группового движения, является, возможно, излишне пессимистическим взглядом. Однако отсутствие реально значимых практических результатов в этой области не может не настораживать. По крайней мере, общие декларируемые принципы групповой робототехники так и остались не реализованными.

В этой работе было сделано три основных предположения.

Первое заключается в том, что необходима некая единая парадигма, объединяющая множество разрозненных, фрагментарных задач групповой робототехники в единую систему.

Второе предположение: такой объединяющей парадигмой могут стать модели социального поведения. В некотором смысле это – своего рода призыв к тому, что надо вновь обратиться к истокам, к природе, из которой робототехники исторически черпали вдохновение. Апелляции к животному миру приводятся почти в каждой работе в интересующей нас области, однако речь здесь идет о едином, системном подходе. Желательно – свободном от весьма искусственных аналогий и даже спекуляций.

Третье предположение – это возможность создания некоторого конструктора, множества механизмов и методов, скомбинировав которые можно строить разнообразные социальные сообщества. И это – самый проблемный пункт. Действительно, с

одной стороны была предложена схема базисных моделей социального поведения и типизация социальных сообществ. С другой – перечень моделей, методов и систем, реализующих эти социальные механизмы. Вплоть до механизмов языкового общения. Более того, был выбран вполне конструктивный целевой объект – муравейник, весьма удобный с технической и методологической точек зрения (муравьи – это эусоциальные животные, их можно «конструировать» из готовых блоков, а готовые блоки – суть технология использования механизма центральных моторных программ и т.д.).

Вопрос не в том, насколько корректны предложенные методы, реализующие те или иные модели социального поведения и организации. Основной проблемный момент заключается в правомерности представления такого сложного объекта, как системы управления социального организма (агента, робота), в виде совокупности функциональных блоков. А феномен социального поведения – в виде множества пусть и взаимодействующих, но независимых механизмов.

В биологии, к которой мы постоянно апеллируем, «носителем» всей этой совокупности механизмов является, вообще говоря, единая структура – центральная нервная система. Социальное сообщество, возможно, – такая же единая система. Есть опасение, что все попытки декомпозиции структуры системы управления особи и типизация социальных сообществ представляют собой вычленение отдельных сторон, свойств единого и неделимого целого. Несомненно, что такая декомпозиция представляется целесообразной прежде всего с технической точки зрения. Однако насколько правомерен такой подход с объективной точки зрения – неясно. Не исключено, что здесь уместна аналогия с известной притчей о слоне и мудрецах, каждый из которых ощупывает лишь одну часть слона и высказывает свое суждение, что представляет собой слон. Перечислим, тем не менее, те основные задачи, которые удалось решить на данный момент:

1. **Методологический базис.** Имеется рабочая схема типизации социальных сообществ, их видов и признаков; определен перечень типов поведения и механизмов их

реализации; дан общий перечень механизмов социального поведения.

2. **Устройство особи и индивидуальное поведение.** Реализован механизм, задающий психофизиологические особенности особей на основе эмоций и темперамента, а также механизм центральных моторных программ как технологическая основа системы управления.
3. **Формальные модели:**
  - введена модель группы роботов в виде статического роя;
  - определены подходы к решению задач хранения и поиска информации, управления, согласованного движения в статическом рое на основе механизма локального взаимодействия;
  - предложены механизмы определения лидера и распределения задач в группе (дифференциация функций).
4. **Реализация ряда отдельных феноменов социального поведения,** таких как механизмы когезии, доминирования, распределения и т.п., а также образование коалиций в коллективе роботов.
5. **Организация локальной коммуникации между членами группы.** Исследованы разнообразные каналы передачи данных (ИК, акустический и т.п.); определены методы синтеза и распознавания сообщений.
6. **Языковое общение.** Предложена знак-ориентированная система управления роботом как основа феномена языкового общения.

Представляется, что именно эти задачи, а точнее – механизмы их решения, образуют конструктивный базис для реализации социальных моделей поведения в групповой робототехнике.

### **Литература**

1. АВЕРКИН А.Н., ГААЗЕ-РАПОПОРТ М.Г., ПОСПЕЛОВ Д.А. *Толковый словарь по искусственному интеллекту.* – М.: Радио и связь, 1992. – 256 с.

2. БЕРНШТЕЙН Н.А. *Биомеханика и физиология движений. Избранные психологические труды.* – Под ред. В.П. Зинченко. – Москва–Воронеж: 1997. – 608 с.
3. *Биологический энциклопедический словарь* / Под. ред. М.С. Гилярова. – 2-е изд., исправленное. – Москва: Советская энциклопедия, 1989. – С. 483.
4. БЛУМЕР Г. *Коллективное поведение* // Американская социологическая мысль: Тексты / Сост. Е.И. Кравченко; под ред. В.И. Добренькова. – М.: Изд-во МГУ, 1994. – С. 90–115. – Пер. Blumer H. *Collective Behavior*. Chapt. XIX–XXII / *New Outline of the Principles of Sociology*. – N.Y., 1951. – P. 167–221.
5. ВАРШАВСКИЙ В.И. *Коллективное поведение автоматов.* – М.: Наука, 1973. – 408 с.
6. ВАРШАВСКИЙ В.И., ПОСПЕЛОВ Д.А. *Оркестр играет без дирижера: размышления об эволюции некоторых технических систем и управлении ими.* – М.: Наука, Главн. ред. физ.-мат. литературы, 1984. – 208 с.
7. ВОРОБЬЕВ В.В. *Логический вывод в статическом роле* // Сб. научных трудов VIII-й Международной научно-практической конференции «Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте», 18-20 мая 2015 г., Коломна, Россия. Т. 2. – М: Физматлит, 2015. — С. 539–548.
8. ГАЗЕ-РАППОПОРТ М.Г., ПОСПЕЛОВ Д.А. *От амебы до робота: модели поведения.* – М.: Наука, 1987. – 288 с.
9. ГУДОЛЛ ДЖ. *Шимпанзе в природе: поведение.* – Пер. с англ. – М.: Мир, 1992. – 670 с. [Jane Goodall. *The Chimpanzees of Gombe: Patterns of Behavior*. The Belknap Press of Harvard University Press. Cambridge, Massachusetts, and London, England 1986].
10. ДАРИНЦЕВ О.В. *Система управления коллективом микроботов* // «Штучный интеллект». – 2006. – №4. – С. 391–399.
11. ДЛУССКИЙ Г.М. *Муравьи рода Формика* – М.: Наука, 1967. – 233 с.
12. ДОБРЫНИН Д.А., КАРПОВ В.Э. *Управление мобильным роботом на основе механизма центральных моторных программ* // Труды Второй Международной конференция «Си-

- стемный анализ и информационные технологии» САИТ-2007, 10-14 сентября 2007 г., Обнинск, Россия. Т. 1. – М.: Издательство ЛКИ, 2007. – С. 24–28.
13. ДЬЮСБЕРИ Д. *Поведение животных: Сравнительные аспекты* / Пер.с англ. – М.: Мир, 1981. – 480 с.
  14. ЗАХАРОВ А.А. *Муравей, семья, колония.* – М.: Наука, 1978. – 144 с.
  15. ЗОРИНА З.А., ПОЛЕТАЕВА И.И., РЕЗНИКОВА Ж.И. *Основы этологии и генетики поведения: Учебник.* – М.: Изд-во МГУ, 2002. – 383 с.
  16. ИТЕЛЬСОН Л.Б. *Лекции по общей психологии: Учебное пособие.* – М.: ООО «Изд-во АСТ», Мн.: Харвест, 2002. – 896 с.
  17. КАЛЯЕВ И.А., ГАЙДУК А.Р., КАПУСТЯН С.Г. *Модели и алгоритмы коллективного поведения в группах роботов.* – М.: Физматлит, 2009. – 280 с.
  18. КАРПОВ В.Э., ВАЛЬЦЕВ В.Б. *Динамическое планирование поведения робота на основе сети «интеллектуальных» нейронов // Искусственный интеллект и принятие решений.* – 2009. – №2. – С. 58–69 (английский перевод: KARPOV V.E., VAL'TSEV V.B. Dynamic Planning of Robot Behavior Based on an “Intellectual” Neuron Network // Scientific and Technical Information Processing. – 2011. – Vol. 38. No. 5. – P. 344–354).
  19. КАРПОВ В.Э. *Импринтинг и центральные моторные программы в робототехнике // Сб. трудов IV Международной научно-практической конференции «Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте» 28-30 мая 2007 г., Коломна, Россия.* – М.: Физматлит, 2007. – С. 322–332.
  20. КАРПОВ В.Э. *Частные механизмы лидерства и самосознания в групповой робототехнике // Тринадцатая национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2012, 16-20 октября 2012 г., Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2012. Т. 3. – С. 275–283.*
  21. КАРПОВ В.Э. *Управление в статических роях. Постановка задачи // Труды VII Международной научно-практической*

- конференции «Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте», 20-22 мая 2013г., Коломна, Россия. Т. 2. – М.: Физматлит, 2013. – С. 730–739.
22. КАРПОВ В.Э. *Эмоции и темперамент роботов. Поведенческие аспекты* // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2014. – №5. – С. 126–145 (английский перевод: KARPOV V.E. Emotions and Temperament of Robots: Behavioral Aspects // Journal of Computer and Systems Sciences International. – 2014. – Vol. 53, No. 5. – P. 743–760.).
  23. КАРПОВ В.Э. *Знак-ориентированный механизм локального взаимодействия между роботами* // Сб. научных трудов VIII-й Международной научно-практической конференции «Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте», 18–20 мая 2015 г., Коломна, Россия. Т. 2. – М.:Физматлит, 2015. – С. 504–514.
  24. КАРПОВА И.П. *Псевдо-аналоговая коммуникация в группе роботов* // Сб. научных трудов VIII-й Международной научно-практической конференции «Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте», 18–20 мая 2015 г., Коломна, Россия. Т. 2. – М.:Физматлит, 2015. – С. 549–558.
  25. КОСТЕНКОВА В.Н., НИКОЛЬСКАЯ К.А. *Сравнительная характеристика психоэмоциональных проявлений у беспородных крыс и крыс линии Вистар* // Журн. высш. нервн. деят. – 2004. – Т. 54, №5. – С. 620–631.
  26. КУЛИНИЧ А.А. *Модель поддержки принятия решений для образования коалиций в условиях неопределенности* // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2012. – №2. – С. 95–106.
  27. КУЛИНИЧ А.А. *Модель командного поведения агентов (роботов): когнитивный подход* // Управление большими системами. – 2014. – №51. – С. 174–196.
  28. КУЛИНИЧ А.А. *Модель кооперации агентов (роботов)* // Труды Четырнадцатой национальной конференции по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2014, 24–27 сентября 2014 г., г. Казань, Россия. Т. 2. – Казань: Изд-во РИЦ «Школа», 2014. – С. 168–176.

29. ЛОРЕНЦ К. *Так называемое зло: к естественной истории агрессии*. – М.: Республика, 1998. – 242 с.
30. МАК-ФАРЛЕНД Д. *Поведение животных: Психобиология, этология и эволюция*: Пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 520 с.
31. МАНДЕЛЬ Б.Р. *Зоопсихология и сравнительная психология*. Учеб. пособие – М.: ФЛИНТА, 2014. – 304 с.
32. МУР Б., ФАЙНА Б. (ред.) *Психоаналитические термины и понятия: словарь* / Пер. с англ. – М.: «Класс», 2000. – 304 с.
33. НОВИКОВА С.С. *Социология: история, основы, институционализация в России*. – М.: Московский психолого-социальный институт; Воронеж: Издательство НПО «МОДЭК», 2000. – 464 с.
34. ОВЧИННИКОВ В.И. *Глоссарий по биосоциологии: Учебно-методическое пособие*. – Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2008. – 33 с.
35. ПАВЛОВСКИЙ В.Е., КИРИКОВА Е.П., ПАВЛОВСКИЙ В.В. *Моделирование поведения больших групп роботов в среде с препятствиями* // Тр. научно-технического семинара «Управление в распределенных сетевых системах и мультиагентных системах». – СПб.: ОАО «Концерн ЦНИИ «Электроприбор», 2010. – С. 10–13.
36. ПАВЛОВСКИЙ В.Е., КИРКОВ А.Ю. *Тональная мультимедийная акустическая коммуникация роботов* // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. – 2013. – №102. – 32 с.
37. ПАНОВ Е.Н. *Методологические проблемы в изучении коммуникации и социального поведения животных* // Проблемы этологии наземных позвоночных. Итоги науки и техники. Сер. Зоол. позвоночных. Т. 12. – М.: ВИНТИ, 1983. – С. 5–70.
38. ПАНОВ Е.Н. *Понятие «сигнал» в аспекте коммуникации животных. О чем речь?* // Этология и зоопсихология. – 2012. – №2(6) – С. 1-35. – [Электронный ресурс] – URL: <http://www.journal.panov-ethology.ru/img/2-2012/Panov-signal.pdf>
39. ПОСПЕЛОВ Д.А., ОСИПОВ Г.С. *Прикладная семиотика* // Новости искусственного интеллекта. – 1999. – №1. – С. 9-35.



40. РЕДЬКО В.Г. *Как промоделировать сознание?* // Сб. по материалам Симпозиума «Сознание и мозг». – Ин-т философии РАН, 30 ноября 2006. – [Электронный ресурс] – URL: <https://www.niisi.ru/iont/projects/rfbr/00179/publications/Redko24.pdf>
41. РЕДЬКО В.Г. *Подходы к разработке компьютерных моделей сознания* // Проблема сознания в философии и науке. Сб. под ред. Д.И. Дубровского. – М.: «Канон+» РООИ «Реабилитация», 2009. – С. 419–424.
42. РОЩЕВСКИЙ Ю.К. *Особенности группового поведения животных.* – Учебн. пособие. – Куйбышев: Обл. типография им. Мяги, 1978. – С. 9–10.
43. СИМОНОВ П.В. *Потребностно-информационная теория эмоций* // Вопросы психологии. – 1982. – №6. – С. 44–56.
44. СОТСКАЯ М.Н. *Зоопсихология: Учебно-методический комплекс в электронной форме (электронный учебник) по курсу «Зоопсихология и сравнительная психология».* – М., 2003–2004. – [Электронный ресурс] – URL: [http://www.ido.edu.ru/psychology/animal\\_psychology/index.html](http://www.ido.edu.ru/psychology/animal_psychology/index.html) // Хрестоматия по зоопсихологии и сравнительной психологии: Учебное пособие МГППУ / Сост. М.Н. Сотская. М., 2003.
45. СТЕПАНОВ Ю.С. *Семиотика.* – М.: Наука, 1971. – 168 с.
46. СТЕФАНЮК В.Л., ЦЕТЛИН М.Л. *О регулировке мощности в коллективе радиостанций* // Проблемы передачи информации. – 1967. – Т. 3, №4. – С. 59–67.
47. СТЕФАНЮК В.Л. *Локальная организация интеллектуальных систем.* – М.: Физматлит, 2004. – 28 с.
48. ТИНБЕРГЕН Н. *Социальное поведение животных / Social Behavior in Animals, 1953 / Пер. с англ. под ред. акад. РАН П.В. Симонова.* – М.: Мир, 1993. – 152 с.
49. ТОПЧИЙ М.В. *Зоопсихология и сравнительная психология: Учебное пособие.* – Ставрополь: СКСИ, 2005. – 272 с.
50. ФЛИЕР А.А. *Происхождение культуры: новая концепция культурогенеза* // Информационный гуманитарный портал «Знание. Понимание. Умение». – 2012. – №4. – [Электронный ресурс] – URL: [http://www.zpu-journal.ru/e-zpu/2012/4/Flier\\_The-Origin-of-Culture/](http://www.zpu-journal.ru/e-zpu/2012/4/Flier_The-Origin-of-Culture/)

51. ХЛЕБОСОЛОВ Е.И. *Роль поведения в экологии и эволюции животных* // Русский орнитологический журнал. – 2005. – В. 277. – Т. 14. – С. 49–55.
52. ХОМАНС ДЖ. *Социальное поведение как обмен. Современная зарубежная социальная психология.* – М.: Изд-во Московского университета, 1984. – С. 82–91.
53. ЦЕТЛИН М.Л. *Исследования по теории автоматов и моделированию биологических систем.* – М.: Наука, 1969. – 316 с.
54. ШИЛОВ И.А. *Эколого-физиологические основы популяционных отношений у животных.* – М.: Изд-во Московского университета, 1977. – 262 с.
55. BARTENEVA D., LAU N., REIS L.P. *A Computational Study on Emotions and Temperament in Multi-Agent Systems* // Proc. AISB'07: Artificial and Ambient Intelligence, Newcastle, GB, CoRR Vol.abs/0809.4784, 2008
56. BRAITENBERG V. *Vehicles: Experiments in synthetic psychology.* – Cambridge, MA: MIT Press, 1984 – P. ??–??.
57. CHRISTENSEN A., REHAN O'GRADY, R. & DORIGO M. *SWARMORPH-script: a language for arbitrary morphology generation in self-assembling robots* // Swarm Intell. – 2008. – No. 2. – P. 143–165.
58. CHURAMAN WAYNE A. *Novel Integrated System Architecture for an Autonomous Jumping Micro-Robot.* – M.S., University of Maryland, 2010 – [Электронный ресурс] – URL: [http://drum.lib.umd.edu/bitstream/1903/10865/1/Churaman\\_umd\\_0117N\\_11519.pdf](http://drum.lib.umd.edu/bitstream/1903/10865/1/Churaman_umd_0117N_11519.pdf) (дата обращения: 04.01.2016).
59. DEWI T., RISMA P., OKTARINA Y. *Wedge Formation Control of Swarm Robots* // The 14th Industrial Electronics Seminar, Electronic Engineering Polytechnic Institute of Surabaya (EEPIS), Indonesia, 2012. – P. 294–298.
60. DUCATELLE F., DI CARO G.A., FÖRSTER A., GAMBARDELLA L.M. *Mobile stigmergic markers for navigation in a heterogeneous robotic swarm* // Proc. 7th International Conference on Swarm Intelligence (ANTS), 2010. – P. 456-463.
61. DUCATELLE F., DI CARO G.A., PINCIROLI C. et al. *Communication assisted navigation in robotic swarms: Self-organization and cooperation* // Proc. IEEE/RSJ International

- Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2011. – P. 4981–4988.
62. GARNIER S., JOST C., JEANSON R. et al. *Collective decision-making by a group of cockroach-like robots* // Proc. Swarm Intelligence Symposium, SIS, IEEE, Los Alamitos, 2005. – P. 233–240.
  63. KARPOV V.E., KARPOVA I.P. *Formation of Control Structures in Static Swarms* // Procedia Engineering, 25th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation. – Vol. 100. – Elsevier, 2015. – P. 1459–1468.
  64. KARPOV V.E., KARPOVA I.P. *Leader election algorithms for static swarms* // Biologically Inspired Cognitive Architectures. – April, 2015. – Vol. 12. – P. 54–64.
  65. MARS. *Caŭm MARS* (Multiple Autonomous Robots) Laboratory, USA, University of Pennsylvania. [Электронный ресурс] – URL: <http://mars.cs.umn.edu/> (дата обращения: 05.01.2016).
  66. NAVARRO INAKI, MATIA FERNANDO. *An Introduction to Swarm Robotics* // ISRN Robotics. – Vol. 2013. – Article ID 608164, 2013. – 10 p.
  67. *Nissan EPORO Robot Car “Goes to School” on Collision-free Driving by Mimicking Fish Behavior* // Advanced Robotic Concept Debuts at CEATEC JAPAN 2009. – [Электронный ресурс] – URL: [http://www.nissan-global.com/EN/NEWS/2009/\\_STORY/091001-01-e.html](http://www.nissan-global.com/EN/NEWS/2009/_STORY/091001-01-e.html) (дата обращения: 05.01.2016).
  68. PUGH J., SKYLER GOODELL, S. & STANLEY K. *Directional Communication in Evolved Multiagent Teams* // Proc. Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO-2014). – New York, NY: ACM – P. 217-224.
  69. RUBENSTEIN M. *Kilobot: A low cost robot with scalable operations designed for collective behaviors* // Robotics and Autonomous Systems. – 2014 – Vol. 62(7). – P. 966-975.
  70. SHI Z., TU J., ZHANG Q. et al. *A Survey of Swarm Robotics System* // Proc. Third Intern. Conf. on Advances in Swarm Intelligence, Shenzhen, China, 2012. – Vol. 1. – P. 564–572.
  71. SIMONOV V.P. *Thwarted action and need – informational theories of emotions* // International Journal on Comparative Psychology. – 1991. – Vol. 5, No. 2. – P. 103-7.

72. *SwarmRobot*. Официальный сайт проекта *SwarmRobot*. – [Электронный ресурс] – URL: [www.swarmrobot.org](http://www.swarmrobot.org). (дата обращения: 05.01.2016).
73. YOGESWARAN M., PONNAMBALAM S.G. *Swarm Robotics: An Extensive Research Review // Advanced Knowledge Application in Practice*, InTech, 2010. – P. 259–278.

## MODELS OF SOCIAL BEHAVIOUR IN THE GROUP ROBOTICS

**Valery Karpov**, National Research Centre “Kurchatov Insitute”, Moscow, Cand.Sc., assistant professor ([karpov\\_ve@mail.ru](mailto:karpov_ve@mail.ru)).

*Abstract: We discuss general principles of interaction in groups of robots based on models of social behavior. A number of the models and methods implementing various forms of social organization in groups of robots on the basis of community typification are offered. We consider such fundamental mechanisms as coalition formation, language communication and task distribution in collectives. Implementation of psychophysiological features on the basis of the mechanism of emotions and temperament lies at the heart of the model of an individual capable to socialization.*

**Keywords:** swarm robotics, social behavior models, language robots communication, tasks distribution in robot collective.

*Статья представлена к публикации членом редакционной коллегии О.П. Кузнецовым.*

*Поступила в редакцию 19.09.2015.  
Опубликована 31.01.2016.*