

КАРПОВ Валерий Эдуардович

**МЕТОДЫ ГРУППОВОГО УПРАВЛЕНИЯ  
ИСКУССТВЕННЫМИ АГЕНТАМИ НА ОСНОВЕ  
БИОЛОГИЧЕСКИ ИНСПИРИРОВАННЫХ  
МОДЕЛЕЙ ПОВЕДЕНИЯ**

Специальность: 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка  
информации, статистика

**ДИССЕРТАЦИЯ**  
на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Москва – 2022

## Содержание

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>5</b>
<b>ГЛАВА 1. МОДЕЛИ СОЦИАЛЬНОГО ПОВЕДЕНИЯ .....</b>	<b>13</b>
1.1. Групповая робототехника.....	13
1.2. Технический подход .....	17
1.3. Модели социального поведения в животном мире.....	20
1.4. Типы социального поведения .....	21
1.5. Социальные сообщества .....	23
1.6. Механизмы обеспечения социального взаимодействия.....	27
1.7. Эусоциальные насекомые.....	30
1.8. Модели и методы реализации социального поведения .....	39
1.9. Выводы к главе 1 .....	43
<b>ГЛАВА 2. УСТРОЙСТВО ИНДИВИДА.....</b>	<b>44</b>
2.1. Элементный базис .....	45
2.1.1.Центральная нервная система .....	46
2.1.2.Психофизиологические особенности особи .....	47
2.2. Эмоции и темперамент роботов.....	47
2.2.1.Эмоции в робототехнике .....	47
2.2.2.Эмоционально-потребностная модель .....	50
2.2.3.Темперамент.....	61
2.2.4.Система управления .....	64
2.2.5.Эксперименты .....	67
2.2.6.Автоматная модель темперамента .....	73
2.2.7.Темперамент и коллективное поведение .....	81
2.3. Самосознание и субъективное Я.....	85
2.3.1.Модель мира и субъективное Я.....	86
2.3.2.Работа с моделью мира .....	88
2.4. Архитектура анимата .....	90
2.5. Выводы к главе 2 .....	95
<b>ГЛАВА 3. МЕХАНИЗМЫ СОЦИАЛЬНОГО ПОВЕДЕНИЯ .....</b>	<b>97</b>
3.1. Локальное взаимодействие.....	97
3.2. Статический рой .....	98
3.3. Определение лидера в группе .....	100
3.3.1.Прямое определение лидера. Выделение доминанта.....	101

3.3.2. Выбор лидера в статическом роев .....	103
3.4. Дифференциация функций .....	116
3.5. Язык и общение .....	120
3.6. Контагиозное поведение .....	123
3.7. Сенсорная модель подражательного поведения .....	126
3.7.1. Языковые схемы подражательного поведения .....	126
3.7.2. Сенсорная модель .....	127
3.7.3. Подражательное поведение .....	128
3.7.4. Комментарии к вопросу о подражательном поведении.....	132
3.8. Феномен паразитического управления .....	133
3.8.1. Изменение характера поведения .....	135
3.8.2. Прямое выстраивание реакций. Регуляция ФКД .....	138
3.8.3. Переориентация реакций .....	140
3.9. Агрессивное поведение .....	144
3.9.1. О роли агрессии .....	144
3.9.2. Факторы агрессивного поведения анимата.....	145
3.10. Подражание и социальное обучение .....	152
3.10.1. Субъективное Я как явный компонент СУ .....	152
3.10.2. Знаковая модель подражательного поведения.....	153
3.10.3. Социальное обучение .....	159
3.11. Выводы к главе 3 .....	164
<b>ГЛАВА 4. ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ.....</b>	<b>166</b>
4.1. Агрессия в задаче территориального распределения .....	166
4.1.1. Пищевое поведение .....	166
4.1.2. Оптимизационная задача размещения.....	167
4.1.3. Постановка содержательной задачи .....	169
4.2. Задача индивидуального патрулирования .....	175
4.3. Территориальный гомеостаз .....	178
4.3.1. Вводные понятия .....	178
4.3.2. Патрулирование .....	180
4.3.3. Задачи конвоирования и эскортирования .....	183
4.3.4. Механизмы территориального гомеостаза.....	184
4.4. Управление социумом .....	194
4.4.1. Специфика управления .....	194
4.4.2. Вопросы этики поведения.....	196

4.4.3. Экспериментальная мораль .....	198
<b>4.5. Фундаментальные элементы .....</b>	<b>208</b>
4.5.1. О сути моделирования социального поведения .....	208
4.5.2. Организм и среда .....	212
4.5.3. О языковых аспектах парадигмы МСП .....	214
4.6. Об устойчивости функционирования.....	214
4.7. Выводы к главе 4 .....	217
<b>ГЛАВА 5. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ .....</b>	<b>219</b>
5.1. Количественные оценки .....	219
5.2. Аппаратный базис .....	221
5.2.1. Роботы.....	221
5.2.2. Полигон .....	226
5.3. Моделирование.....	228
5.3.1. Система KVORUM .....	229
5.3.2. Архитектура системы моделирования.....	231
5.4. Проект "Кибермуравейник" .....	235
5.4.1. Общая схема.....	235
5.4.2. Архитектура программно-аппаратного комплекса .....	237
5.5. Задачи проекта "Кибермуравейник" .....	244
5.5.1. Распределение роботов по индивидуальным участкам .....	245
5.5.2. Мобилизация .....	246
5.5.3. Исследование территории.....	251
5.6. Прочие задачи.....	256
5.7. Выводы к главе 5 .....	264
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>267</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 1. МОДЕЛЬ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ПАМЯТИ АНИМАТА .....</b>	<b>272</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 2. АКТЫ О ВНЕДРЕНИИ .....</b>	<b>282</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>290</b>
<b>ТЕРМИНЫ И СОКРАЩЕНИЯ.....</b>	<b>311</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из видов сложных распределенных систем являются системы групповой робототехники. Идеейной основой групповой робототехники является тезис о том, что решение ряда сложных технических задач может быть получено путем использования большой совокупности взаимодействующих между собой сравнительно простых устройств – группы роботов. Помимо того, что такие групповые системы должны обладать свойствами надежности, масштабируемости, универсализма и пр., говорится также о неизбежном появлении эмерджентных эффектов, определяющих новое качество подобного рода комплексов. Первые практически значимые результаты – реальные проекты – в этой области были получены уже около тридцати лет тому назад; с тех пор групповая робототехника прочно заняла место в ряду магистральных направлений развития науки и техники. По крайней мере, в работе [Dudek и др., 1993] имеются ссылки на труды даже 80-х гг. Вместе с тем мы рискнем высказать весьма категоричное суждение: ожидания оказались несколько завышенными, а в области групповой робототехники наблюдается ряд серьезных проблемных моментов (если не называть это стагнацией). Это суждение является действительно рискованным, особенно в свете значимости систем групповой робототехники (ГР) для всех сфер деятельности (научной, промышленной, оборонной), количества средств, выделяемых на исследования и разработку систем ГР, растущего количества проектов в этой области.

Анализ состояния дел в ГР показывает, что, несмотря на ее декларируемое устойчивое и поступательное развитие, исследования носят, в основном, фрагментарный характер. Решаются почти все мыслимые частные задачи (см., например, [Tan, 2015], [Bayindir, 2016], [Сырямкин, 2018] и др.), однако об общности подходов и методов приходится говорить гораздо осторожнее. Во-вторых, подавляющее большинство задач группового управления сводится к совместному движению, причем основанному на простейших формах взаимодействия членов группы. Более сложным формам поведения и способам взаимодействия уделяется гораздо меньше внимания. В-третьих, характерным признаком является не просто появление множества поднаправлений ГР – стайная, коллективная, роевая и прочая робототехника, но перенос центра тяжести именно в область роевых систем, если понимать под этим группы агентов, определяющих свое поведение по характеру поведения своих соседей. В-четвертых, значительная часть исследований носит исключительно модельный характер, что не является достаточным для робототехники как принципиально технической области. Всё это – быстрый старт в

конце 80-х гг. XX века, отсутствие явных синергетических свойств систем ГР, превалирование централизованных способов управления в реально работающих системах – неизбежно активизирует поиск общих парадигм, методологий и подходов к решению задач группового управления.

Таким образом, научная проблема создания эффективных принципов и моделей группового управления роботами, функционирующими в сложных, динамических средах, по-прежнему является **актуальной**. При этом здесь речь идет о создании общих методологических принципов разработки систем ГР, позволяющих решать комплексные задачи группового управления и формирующих основу для появления явных синергетических эффектов. В качестве такой основы предлагается использовать т.н. парадигму моделей социального поведения роботов, суть которой сводится к тому, что проявление качественных, эмерджентных свойств в системах ГР возможно в условиях, при которых группа роботов образует т.н. "социальное сообщество". При этом социальная организация сообщества роботов рассматривается как один из возможных адаптивных путей развития технической системы. Впервые эта идея былазвучена автором в 2009 г. на Поспеловских чтениях (Москва, Политехнический музей) в заключительной части доклада «Интеллектуальные роботы». Подчеркнем, что здесь и далее термин социум рассматривается не как гуманитарное, а как сугубо биологическое понятие. В биологии образование социальных сообществ рассматривается как один из путей адаптации живых организмов, причем этот способ обусловлен наличием ряда специфических механизмов внутригруппового взаимодействия.

Важным представляется то, что в ходе данного исследования была сформулирована обобщенная задача – задача поддержания территориального гомеостаза (ТГ). К этой задаче сводится ряд практических задач групповой робототехники, таких как патрулирование, охрана территории, разведка, фуражировка и т.д. В диссертации показано, что функциональный базис решения задачи ТГ построен именно на механизмах социального поведения.

Сегодня реализация принципов группового управления основывается на целом ряде исследований в области формальных моделей поведения, теории многоагентных систем и пр., включая биологически инспирированные подходы. Исходя из этого, следует отметить классические работы из области моделей поведения (в т.ч. коллективного и группового) – таких авторов как М.Л. Цетлин, В.И. Варшавский, М.Г. Гаазе-Рапопорт, Д.А. Поспелов, В.Л. Стефанюк; в области многоагентного управления – В.Б. Тарасов, В.И. Городецкий, А.А. Кулинич; в области систем групповой робототехники – И.А. Каляев, С.Г. Капустян, В.М. Лохин, С.Л. Зенкевич, В.Е. Павловский, А.С. Ющенко;

этология и социальное поведение – А.А. Захаров, Г.М. Длусский, Ж.И. Резникова, А.А. Панов; поведение сетевых структур – О.П. Кузнецов; семиотические модели – Г.С. Осипов, теория аниматов и адаптивных агентов – В.Г. Редько, К.В. Анохин. Среди зарубежных исследований в этой и близких областях можно выделить работы В. Брайтенберга (V. Braitenberg) – применение языка психологии для описания поведения мобильных роботов, Р. Брукса (R. Brooks) – общая групповая робототехника и использование эмоций в робототехнике, Ц. Бризиел (C. Breazeal) – социальные аспекты робототехники, М. Дориго и Т. Лабелла (M. Dorigo, T.H. Labella) – муравьино-подобные модели поведения групп роботов, Дж. Эпштейна и Р. Акстелла (J.M. Epstein, R. Axtell) – исследования искусственных сообществ.

Анализ работ как вышеупомянутых отечественных, так и зарубежных исследователей, позволяет сделать вывод о том, что концепция создания социальных сообществ роботов (искусственных агентов в общем) как общего подхода к групповому управлению является новой постановкой задачи.

В тексте диссертации много материала из области биологии, мирмекологии (раздела биологии, посвященного изучению муравьев), психологии и даже, в конце, моральной философии. Кроме того, многие предлагаемые модели носят описательный, качественный характер. Однако это представляется крайне важным для понимания сути предлагаемых подходов, хотя бы в силу того, что предлагаемое исследование, являясь по сути техническим, относится к категории биологически инспирированных направлений.

**Цель и задачи диссертационного исследования.** Настоящая диссертация посвящена разработке общего методологического базиса для построения систем ГР, основанного на биологически инспирированных моделях социального поведения, с целью создания коллективов (социумов) агентов, способных решать широкий круг комплексных задач. Рассматривая задачи ГР с точки зрения моделей социального поведения, можно не только объединить отдельные, фрагментарно решаемые задачи ГР, но и определить, какие механизмы и методы требуется создать для возникновения ожидаемых эмерджентных эффектов в группах роботов. С pragматической точки зрения речь идет о создании базового набора моделей поведения, повышающих адаптивные способности групп искусственных агентов. Практические задачи ГР – патрулирование, охрана и мониторинг территории, рекогносцировка и т.п. – рассматриваются при этом как частные проявления общей задачи – устойчивого во времени функционирования группы агентов на ограниченной территории.

Поэтому основной **целью** диссертации является расширение функциональных и адаптивных возможностей и областей применения групп искусственных агентов (роботов)

при решении сложных задач в недетерминированных динамических средах на основе парадигмы моделей социального поведения.

**Научная проблема**, решение которой содержится в диссертации, – создание моделей, методов и алгоритмов, реализующих базис социального поведения для организации управления и взаимодействия в группах искусственных агентов, функционирующих в сложных динамических и недетерминированных средах. Под базисом понимается необходимое и достаточное множество механизмов, определяющих как принципы индивидуальной организации, так и способы внутригруппового взаимодействия группы агентов, образующих социальное сообщество. Создаваемые механизмы социального взаимодействия рассматриваются как способы повышения адаптивных способностей группы агентов. Исходя из этого, специфика механизмов заключается не в их "вычислительной" эффективности, а в универсализме метода решения задачи обеспечения устойчивости функционирования (выживания) групповой системы в сложных средах. При этом создание базисного набора таких механизмов и сведение множества решений частных прикладных задач к единой задаче выживания является принципиально новым подходом в групповом управлении.

В соответствии с поставленной целью для решения сформулированной научной проблемы определены следующие **задачи диссертационного исследования**:

1. Анализ моделей, связанных с социальными аспектами организации групп искусственных агентов и собственно моделей социального поведения, выделение базовых компонентов и механизмов, формирование на их основе концептуальной схемы построения социума искусственных агентов – роботов.
2. Разработка моделей и архитектур систем управления агентов (роботов), способных к социальному взаимодействию.
3. Разработка моделей и алгоритмов, реализующих базис механизмов группового взаимодействия, обеспечивающих не только формирование социальных структур, но и определяющих способы целенаправленного управления социумом искусственных агентов.
4. Разработка комплекса программных и технических решений по реализации созданных моделей и методов для решения прикладных задач группового управления роботами.

## **Методы исследований**

В работе использованы оригинальные подходы и процедуры, предложенные в диссертации, в том числе:

- принципы организации систем управления агентов, основанные на эмоционально-потребностной схеме;
- вариации семиотических моделей представления знаний для реализации феноменов подражательного поведения и социального обучения;
- методы манипуляционного управления поведением агентов;
- модель статического роя как основа формализма описания процессов межагентного взаимодействия;
- многоуровневая автоматная модель описания сложных форм поведения агентов.

Применялись также такие классические методы исследования, как: элементы теории множеств и дискретной математики; методы автоматного программирования; элементы теории автоматического управления; методы имитационного и агентного моделирования; этологические основания организации эусоциальных сообществ и элементы мирмекологии.

**Научная новизна и основные результаты диссертации.** В ходе диссертационного исследования был создан новый подход к организации группового управления, обеспечивающего формирование социальных сообществ искусственных агентов на основе разработанных биологически инспирированных моделей, методов и алгоритмов организации внутригруппового взаимодействия. Впервые предложено систематическое рассмотрение механизмов образования социума как пути развития адаптационных возможностей применительно к группам искусственных агентов – роботов.

**На защиту выносятся** следующие новые научные **результаты**:

1. Подход к организации группового взаимодействия искусственных агентов, основанный на принципах построения социальных сообществ и позволяющий создавать устойчивые образования для совместного решения комплексных задач.
2. Трехуровневая эмоционально-потребностная система управления агента, обеспечивающая его способность к социальному взаимодействию.
3. Методы управления целенаправленным поведением агентов, основанные на варьировании параметров эмоционально-потребностной схемы.
4. Методы и алгоритмы, реализующие базисные механизмы социального поведения и организации социума в группах агентов (стремление держаться вместе, подражательное поведение, отзывчивость на эмоциональное состояние, доминирование и др.).
5. Методы выбора лидера в группе агентов, основанные на а) процедуре динамического определения доминанта и б) процедуре голосования в однородной группе агентов.

6. Способы организации группового взаимодействия агентов и методы управления социумом искусственных агентов для решения прикладных задач из области групповой робототехники (патрулирование, мониторинг, разведка, охрана).

**Достоверность и обоснованность** полученных в диссертационной работе результатов подтверждается вычислительными экспериментами, апробацией на реальных робототехнических системах, а также реализацией полученных научных результатов в системах группового управления для решения прикладных задач.

### **Теоретическая и практическая значимость**

Научная значимость работы заключается в том, что в рамках биологически инспирированных моделей поведения разработаны теоретические основы построения новой формы организации группового управления, основанного на принципах взаимодействия искусственных агентов, аналогичных тем, которые наблюдаются в социуме живых организмов.

Практическая ценность полученных научных результатов заключается в:

- повышении качества управления робототехническими комплексами за счет использования эффективных алгоритмов группового взаимодействия;
- расширении функциональных возможностей (поведенческого репертуара) систем групповой робототехники за счет реализации механизмов социальной самоорганизации в задачах группового патрулирования, разведки, охраны территории и пр.;
- формировании универсального ограниченного набора механизмов внутригруппового взаимодействия – базисного набора моделей поведения, – необходимого и достаточного для организации устойчивого функционирования технических систем в естественных средах.

**Реализация и внедрение результатов работы.** Основными результатами практического внедрения было создание компонент системы управления коллаборативной тренировочной роботизированной наземной мобильной платформы, решающей задачи мониторинга и разведки в условиях угрозы или возникновения чрезвычайных ситуаций (аварийно-спасательное формирование ООО «ЯРСПАС»), а также создание системы мониторинга прибрежной акватории группой малых автономных необитаемых подводных аппаратов (ООО «Аварийно-спасательная служба Нефтегазового и Топливно-Энергетического Комплекса»).

Помимо этого, теоретические и практические результаты диссертационной работы использованы при выполнении госбюджетных НИОКР в НИЦ "Курчатовский институт",

научным руководителем, ответственным исполнителем и непосредственным участником которых являлся автор диссертации, а также ряда проектов РФФИ и РНФ. Наиболее важными из них являются:

1. Грант РФФИ №17-29-07083 офи\_м. "Исследование и моделирование механизмов регуляции социального поведения и обучения для группы автономных роботов" (руководитель).
2. Грант РНФ 16-11-00018 (2016-2018). "Исследование методов организации коллектива роботов на основе моделирования эусоциальных сообществ" (руководитель).
3. Грант РФФИ 16-29-04412 офи\_м (2016-2018). "Теоретические и экспериментальные исследования по организации и самоорганизации в группах роботов" (исполнитель).
4. Грант РФФИ № 15-01-07900 (2015-2017). "Разработка и исследование моделей и методов непосредственной языковой коммуникации на основе семиотических моделей для реализации социального поведения в групповой робототехнике" (руководитель).
5. Грант РФФИ 15-07-07483 (2015-2017). "Исследование методов и разработка алгоритмов картирования, локализации и автоматического планирования траектории сложных технических объектов, обладающих многими степенями свободы" (исполнитель).
6. Грант РФФИ 14-01-00817. "Модели социального поведения в групповой робототехнике" (руководитель).

Кроме того, результаты работы использовались при выполнении ряда НИР (Госзадание НИЦ "Курчатовский институт"; программа Мониторинг-СГ), в учебном процессе (МФТИ, НИУ ВШЭ) и даже при создании систем управления аниматронными комплексами (область *ScienceArt*). Внедрение результатов диссертации позволило расширить функциональные и адаптивные возможности и области применения автономных робототехнических комплексов.

**Соответствие паспорту специальности.** Диссертация соответствует паспорту специальности "Системный анализ, управление и обработка информации, статистика" по формуле и по областям исследования: пп.3, 4, 5 и 9: (3) разработка критериев и моделей описания и оценки эффективности решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации; (4) разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации; (5) разработка специального математического и

алгоритмического обеспечения систем анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации; (9) разработка проблемно-ориентированных систем управления, принятия решений и оптимизации технических объектов.

Основные результаты работы докладывались диссертантом и обсуждались более чем на 20 всероссийских и международных научно-технических конференциях и семинарах:

Национальные конференции по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2012, КИИ-2014, КИИ-2016, КИИ-2020; 12-я Мультиконференция по проблемам управления (с. Дивноморское, Геленджик, 2019); DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation (Vienna, Austria, 2014, Zadar, Croatia; 2018); конференция «Состояние и направления развития искусственного интеллекта – 2018», (ФГАУ КВЦ «Патриот», 2018 г.); международная научно-практическая конференция «Информатика и прикладная математика» (Алматы, Казахстан, 2017); PTI 2017: 2nd International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry” (Varna, Bulgaria, 2017); VI международная научно-техническая конференция "Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем" (Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS-2016, Минск, 2016); IX World Conference on Intelligent Systems for Industrial Automation WCIS-2016 (Tashkent, Uzbekistan, 2016); Interactive Collaborative Robotics. First International Conference, ICR 2016 (Budapest, Hungary, 2016); VI, VII и VIII Международная научно-техническая конференция "Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте" (Коломна, 2011, 2013, 2015 гг.); Всероссийская научная школа "Современная мехатроника" (Орехово-Зуево, 2011) и др.

Наиболее значимыми докладами являются: доклад "Социальное поведение роботов. Промежуточные итоги исследований" на Общемосковском научном семинаре "Проблемы искусственного интеллекта" (РАИИ), 2017 г.; доклад "Социум роботов: химера или естественное развитие механизмов адаптации" на Московском этологическом семинаре (Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН), 2019 г.; пленарный доклад "Модели социального поведения в групповой робототехнике" на XVII национальной конференции по искусственному интеллекту КИИ-2019; доклад "Управление социальными сообществами роботов" на заседании Секции кибернетики Центрального дома ученых, 2019 г. В этих докладах предлагаемые модели и алгоритмы проходили апробацию как с формальной, технической точки зрения, так и с позиций их содержательной интерпретации, т.е. адекватности поведению животных.

# ГЛАВА 1. МОДЕЛИ СОЦИАЛЬНОГО ПОВЕДЕНИЯ

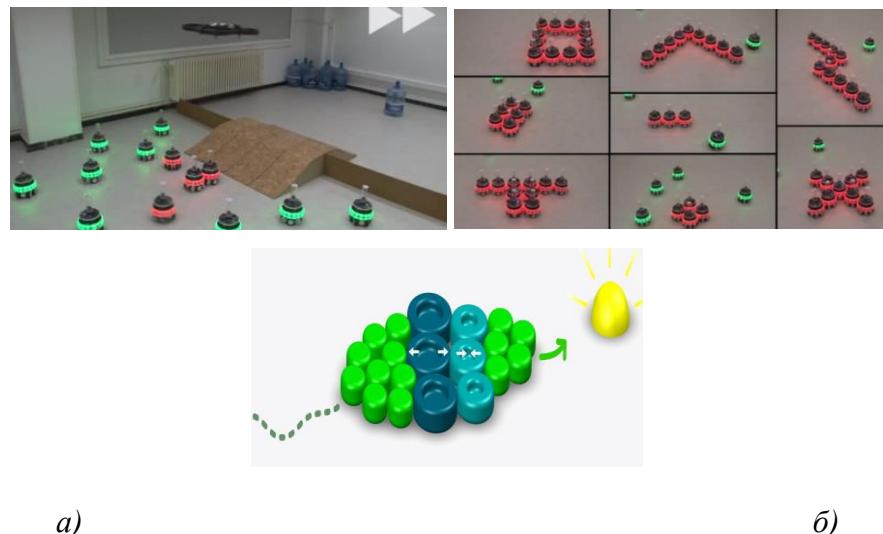
## 1.1. Групповая робототехника

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, принадлежащие школе М.Л. Цетлина и его последователей, см., например, [Цетлин, 1969]. В свою очередь первые практические результаты в виде реальных проектов в области 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 общий обзор проектов из области групповой робототехники является тяжелой задачей. Слишком велико количество существующих не только теоретических моделей, но и реально работающих систем. На запрос "*swarm robot*" Google выдает около 10 млн. ссылок (в системе Scopus – более 3000 ссылок). Забегая вперед, заметим, что на запрос "*ant robotics*" (робот-муравей – один из любимых объектов для подражания и проведения аналогий в групповой робототехнике) тот же Google выдает более 4.5 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 [Zhiguo и др., 2012], [Yogeswaran, Ponnambalam, 2010] и [Trianni, Campo, 2015]. 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, и, зачастую, малосодержательных задач. Эти типовые задачи, согласно работе [Navarro, Matia, 2013] 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 (Рис. 1.1).
4. Согласованное движение (Collective Movement). Задача координации движения группы роботов и их группового перемещения. Считается основной поведенческой задачей групповой или роевой робототехники (Рис. 1.1).
5. Распределение задач (Task Allocation). Своего рода "опциональная", вспомогательная задача, которая заключается в распределении ролей или 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. Коллективная фуражировка 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.



*Рис. 1.1. Создание форм и согласованное движение: а) роботы проекта Swarmoid [Dorigo, 2011], б) роботы-частицы [Li и др., 2019]*

Впрочем, в [Siciliano, Khatib, 2016] распределению задач (task allocation) уделяется уже больше внимания.

Редким примером проявления явной эмерджентности является описание созданных в МИТ группы роботов-частиц (Рис. 1.1,б), обладающих по отдельности лишь одной степенью свободы, но способных перемещаться группой в произвольном направлении [Li и др., 2019].

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 наметившейся стагнации 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 до сих пор имеется явный перенос центра тяжести исследований именно в роевую робототехнику, которая может рассматриваться как более простой, базовый уровень моделей групповой (в общем смысле) робототехники. С другой стороны, в роевую робототехнику необоснованно мигрируют термины типа "коллектив", что видно по приведенному выше перечню задач [Navarro, Matia, 2013].

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.

В предлагаемой работе выдвигается следующее предположение: в качестве единой методологической основы создания систем групповой робототехники целесообразно использовать модели социального поведения [Карпов, 2016а]. При этом необходимо рассматривать эти модели как есть, т.е. с внешней, феноменологической точки зрения, не вдаваясь в причины их возникновения. 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, естественно, вызывает ряд критических замечаний, однако, как мы постараемся показать дальше, он может быть вполне обоснован. Причем как с биологической и технической сторон, так и с точки зрения получения вполне конкретных практических результатов.

На самом деле, термины типа "социальное поведение" и "биологическая инспирированность", аналогии с поведением эусоциальных животных и пр. широко присутствуют в работах по групповой (роевой) робототехнике. Однако, в основном, все ограничивается использованием оптимизационных методов типа "колония муравьев" ("Ant Colony Optimization"), "рой частиц" ("Particle Swarm Optimization"), "колония пчел" ("Honey Bee Colony Optimization") и т.п. Этим моделированием некоторых внешних феноменов поведения и ограничиваются декларируемые "инспирированность" и "социальность" в групповой (роевой) робототехнике, см., например, [Jevtic, Andina, 2007], [Zoghby и др., 2014]. Характерно, например, что в обзоре [Shlyakhov, Vatamaniuk, Ronzhin, 2017] описываются модели и методы решения задачи агрегации автономных роботов, основанные на аналогиях с поведением биологических объектов. При этом основными описываемыми механизмами являются метод виртуальных сил, вероятностные методы (основанные на применении конечно-автоматных моделей) и обучаемые нейронные сети, отнесенные к категории эволюционных методов.

Сегодня сочетание терминов "робот" и "социум" понимается как направление, связанное с т.н. социальной робототехникой. Речь здесь идет в основном о создании роботов, предназначенных для работы в человеческом социуме (проблемы общения, безопасности, особенности коммуникации и т.п.) [Campa, 2016]. Значительно реже встречается постановка задачи создания социума роботов. В лучшем случае как объекты исследований выделяются некоторые отдельные феномены, относящиеся к категории социальных. Так, например, основной целью проекта ASSISI является создание сообщества роботов, способных к организации коммуникационных каналов с сообществами животных (пчелы и стаи рыб) [ASSISIbf, 2018].

Таким образом, можно говорить об отсутствии в групповой робототехнике исследований по реализации моделей социального поведения с целью создания систем с качественно более сложным, чем роевое, поведением. Собственно, создание социума роботов рассматривается в этой работе как способ решения задачи выживания или как реализация некоторого адаптационного механизма.

Будем считать, что термин **социум** является интуитивно понятным. Есть основания полагать, что это понятие является *терминоидом*, т.е. лексической единицей, используемой для номинации неоднозначно понимаемых понятий, не завершивших (пока) процесс своего формирования [Осипов и др., 2018].

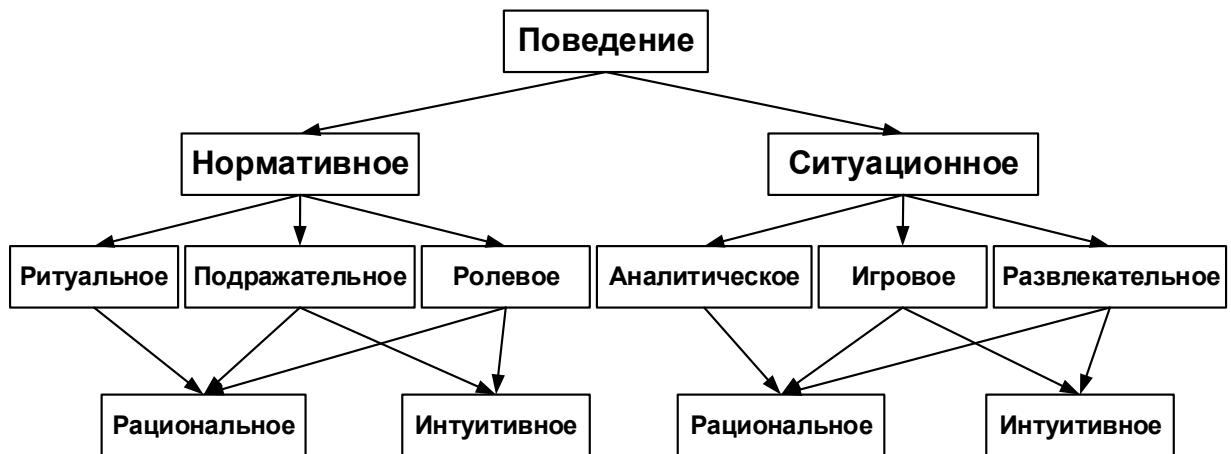
## 1.2. Технический подход

Использование различных моделей поведения при создании 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. Повторим, что мы говорим о моделях взаимодействия элементов технических систем друг с другом, исключая социальность с точки зрения человека-машинного взаимодействия.

Такая постановка вопроса, разумеется, не нова. В 60-е гг. XX века сформировалась школа, изучающая различные модели поведения на основе конечных автоматов. Основным тезисом являлось утверждение, что любое достаточно сложное поведение слагается из совокупности простых поведенческих актов [Цетлин, 1969]. Первая работа, в которой был предложен и использован термин "коллективное поведение автоматов", была опубликована еще в 1963 году [Гельфанд, Пятецкий-Шапиро, Цетлин, 1963]. 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 [Варшавский, 1973]. В частности, на базе подобных моделей был разработан фундамент сотовой связи (задача о коллективе радиостанций, которым надо "договариваться" между собой о мощности своих сигналов) [Стефанюк, Цетлин, 1967], [Стефанюк, 2004]. 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, [Варшавский, Поспелов, 1984], [Гаазе-Рапопорт, Поспелов, 2004]. Проблема, однако, в том, что эти модели, как и автоматные, являются формальными 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 [Гаазе-Рапопорт, Поспелов, 2004] приведен ряд примеров реализации механизмов поведения и дана вполне конструктивная схема классификации типов поведения, Рис. 1.2.



*Рис. 1.2. Типы поведения по М.Г. Гаазе-Рапопорту 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 работе И.А. Каляева и др. [Каляев, Гайдук, Капустян, 2009] 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 об общих 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. 1.3:



*Рис. 1.3. Отличие множества особей от коллектива – в полноте информации о структуре группы, целях и задачах (согласно [Каляев, Гайдук, Капустян, 2009])*

Однако и этот подход вряд ли может считаться достаточным для понимания принципов организации сообществ.

Следует отметить еще одно обстоятельство. Специалистам в области многоагентных систем хорошо знаком термин "Искусственное сообщество". В книге Дж.Эпштейна и Р.Акстелла [Epstein, Axtell, 1996] "Growing Artificial Societies: Social Science from the Bottom Up" описывается некоторая агентная модель, развитие которой приводит, по мнению авторов, к появлению эффектов и явлений, наблюдавшихся в человеческих социальных сообществах. При этом сами агенты крайне примитивны, а правила, определяющие их поведение, крайне просты. Проста и окружающая их среда, "Sugarscape", – двумерная сетка, на которой произрастает поедаемый агентами "сахар". Более того, сами основатели этого направления говорят об "удивительной достаточности простых правил" ("The Surprising Sufficiency of Simple Rules") для создания сложных систем. Однако, как будет видно дальше, агент, способный к социальному взаимодействию, никак не может быть простым в силу сложности решаемых им задач. В противном случае мы имеем дело с игрой с терминами (если не спекуляциями). Сейчас "Искусственные сообщества" – это одно из направлений теории многоагентных систем, решающих различные задачи из области экономики, логистики, социологии и т.п. При этом ни мало не заботящееся о методических (этологических) обоснованиях. О направленности исследований в этой области можно судить, например, по содержанию различного рода специальных журналов и прочих ресурсов (см., например, [JASSS, 2019], [RofASSS, 2019] или работу [Mills, 2010]).

Итак, ни формальные модели поведения, ни теория многоагентных систем не позволяют получить конструктивные модели формирования социума. Обратимся поэтому к биологии, а точнее – к такому ее разделу, как этология.

### **1.3. 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 другие 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 поведение 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. [Гиляров, 1989], [Рощевский, 1978], [Хлебосолов, 2005]. Немногим лучше выглядят и другие определения социального поведения, а именно:

**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 ею территории). Социальное поведение проявляется в виде различных взаимоотношений между особями и между их группировками, осуществляемых коммуникативным поведением [Овчинников, 2008].

Н. Тинберген [Тинберген, 1993] 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 [Блумер, 1994] и А.Я. Флиера [Флиер, 2012]. У этих авторов социальное поведение – это такое поведение членов социума (популяции), которое обусловлено интересами общины, способствует ее

сохранению и воспроизведству 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 задачи адаптации, которые для отдельно взятой особи являются непосильными. Это вполне созвучно основной парадигме групповой робототехники.

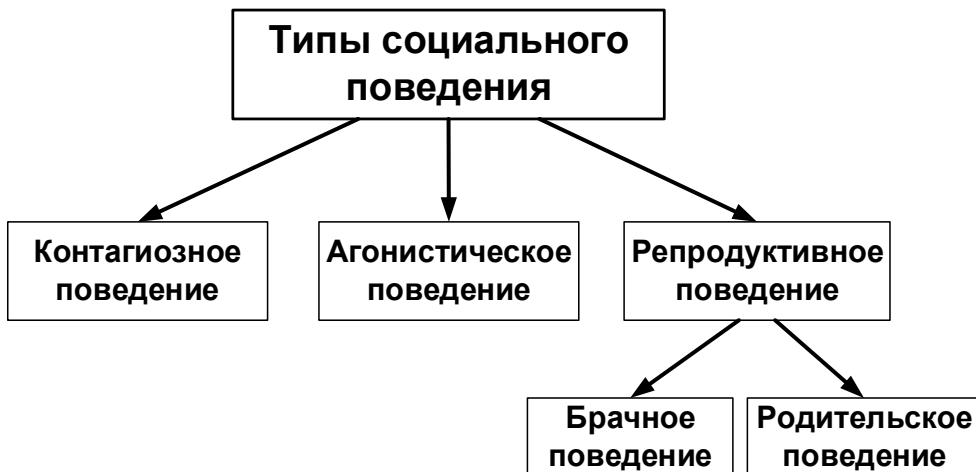
**Поведение и действие.** Еще одним интересным моментом является то, как в этологии определяются понятия "поведение" и "действие". Если поведение – это ответная реакция организма на внутренние или внешние раздражители (оно может быть рефлекторным, неосознанным или намеренным, осознанным), то действие – это только некоторые виды поведения [Новикова, 2000]. С другой стороны, в [Мур, Файна, 2000] 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.

Здесь нам потребуется важное с точки зрения поведения понятие – фиксированный комплекс действий или ФКД. В этологии ФКД – это специфичные для каждого вида поведенческие последовательности, форма которых является постоянной и закрепленной генетически. Теперь можно определиться с понятием поведения:

**Поведение и ФКД.** Итак, будем считать, что поведение – это условное наименование выделяемых последовательностей действий или элементов ФКД с точки зрения выполнения той или иной функции или достижения некоторой цели. Здесь мы хотим подчеркнуть некоторую условность этого понятия, его субъективную (относительно наблюдателя) сущность.

#### **1.4. Типы социального поведения**

Этология, как и зоопсихология, привлекательна множеством различных видов типизаций 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 социального поведения, показанная на Рис. 1.4 (см, например, [Гудолл, 1992], [Зорина, Полетаева, Резникова, 2002], [Мак-Фарленд, 1988], [Тинберген, 1993]).



*Рис. 1.4. 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, [Тинберген, 1993]) 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. Считается, что поддержание структуры сообщества осуществляется именно на основе агонистического поведения (нападения, угрозы, подчинения и бегства), см., например, [Зорина, Полетаева, Резникова, 2002]. Установление иерархии может происходить в результате прямых столкновений и драк. Это вполне соответствует тому, насколько много внимания уделяется агрессивному поведению в [Гудолл, 1992] (принимая, что агрессивное и агонистическое поведение – это одно и то же).

**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 потомства. С точки зрения групповой робототехники нас интересует в первую очередь аспект обучения.

Отметим еще раз, что основная идея парадигмы моделей социального поведения (МСП) заключается в том, чтобы рассматривать принципы организации сообществ роботов с точки зрения некоторого универсального адаптационного механизма. Сам

вопрос о видах поведения, в т.ч. – социального – является до сих пор открытым. Так, с одной стороны психологи и биологи говорят о четырех основных формах поведения: пищевое, оборонительное, половое и исследовательское, см., например, [Лурия, 2007]. С другой стороны, те же этологи или специалисты в области социальной биологии выделяют дополнительные, специфические формы и модели поведения, необходимые для организации социума, такие, как контагиозное (заразное), подражательное, агрессивное и пр. [Зорина, Полетаева, Резникова, 2002]. Многие из этих механизмов достаточно сильно пересекаются друг с другом, зачастую представляя собой лишь некоторое условное обозначение проявления тех или иных базовых механизмов. Так, возникает сомнение в существовании агрессивного поведения как самостоятельной, специфичной сущности ([Карпова, Карпов, 2018]), хотя о самой агрессии написано множество фундаментальных трудов (правда, чаще представляющих объемное описание тех или иных феноменов и проявлений того, что мы называем агрессией, см. [Лоренц, 1994], [Ениколопов, Кузнецова, Чудова, 2014] и др.)

Итак, типизация социального поведения – это базовая схема, позволяющая определить лишь основные направления построения систем групповой робототехники. Теперь рассмотрим более детально устройство групп, позволяющих строить социальные системы.

## **1.5. Социальные сообщества**

Начнем с принятых в этологии определений.

**Сообществом** называется такой тип внутрипопуляционных отношений, при котором особи образуют стабильные группировки, занимающие и защищающие определенную территорию [Зорина, Полетаева, Резникова, 2002]. 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 *микропопуляцией*.

**Организованное сообщество.** Для того чтобы группа животных была названа организованным сообществом, должны выполняться пять правил [Дьюсбери, 1981]:

1. Наличие системы коммуникаций. Все организованные сообщества обладают сложной системой непосредственного общения путем передачи друг другу различных сигналов – звуков, жестов, мимики, положения тела и др.

2. Разделение функций, основанное на специализации (например, 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 в группу 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 работам [Мандель, 2014], [Сотская, 2003] и, разумеется, [Зорина, Полетаева, Резникова, 2002], к конструктивной схеме, на которой представлены виды сообществ, Рис. 1.5.

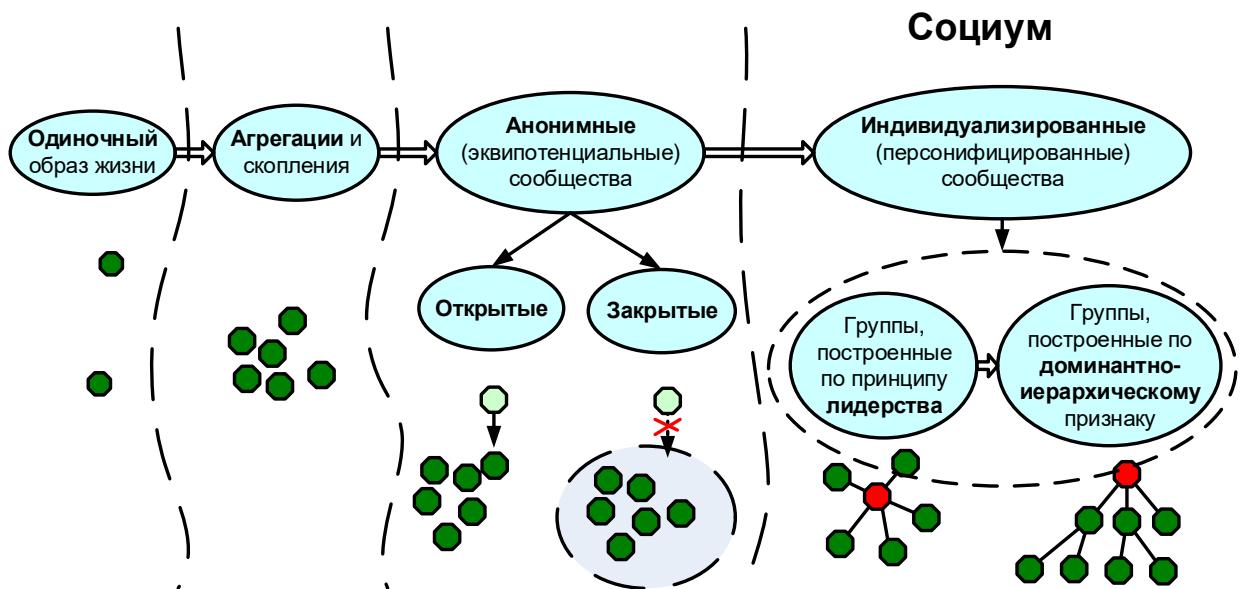


Рис. 1.5. Виды сообществ. Усложнение структуры групп

**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 головастиков в прогретых

солнцем местах водоема [Зорина, Полетаева, Резникова, 2002]. Скопления характерны для многих видов беспозвоночных.

**3. Анонимные сообщества.** Согласно К. Лоренцу [Лоренц, 1994] 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") [Лоренц, 1994]. 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 [Зорина, Полетаева, Резникова, 2002]:

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

Объединив типологию сообществ (Рис. 1.5) и вышеперечисленные признаки, мы получим схему, отображающую наличие/отсутствие признаков у различных группировок, Табл. 1.1.

Табл. 1.1. Виды и признаки сообществ

<b>Вид сообщества</b>		<b>Признак</b>			
		Устойчи- вость во времени	Взаимная координа- ция	Проч- ность связей	Агрессия к чужакам
1. Одиночный образ жизни		-	-	-	+
2. Агрегации и скопления		-	-	-	-
3. Анонимные сообщества	открытые	-	+	-	-
	закрытые	-	+	-	+
4. Индивидуа- лизированные сообщества	по принципу лидерства	+	+	+	+
	по доминантно- иерархическому признаку	+	+	+	+

### Усложнение структуры групп

В этологии определены весьма четкие критерии и характеристики структур групп [Шилов, 1977]. Простейшую структуру имеют группы эквипотенциального 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 (они характеризуются определенной разнофункциональностью составляющих их особей, на основе которой формируется внутригрупповая структура), а также группы, построенные по доминантно-иерархическому типу с вожаком.

Другим критерием типизации структур является специализация особей [Ительсон, 2002]. Согласно ему 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. Общественные объединения 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 [Дьюсбери, 1981]. Исходя из этого, выделяют две системы иерархии [Топчий, 2005]:

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

Различается ряд форм абсолютной иерархии [Топчий, 2005]: 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 [Зорина, Полетаева, Резникова, 2002].

2. Одним из механизмов определения лидера является выделение *доминанта*: если особь в своем поведении не ориентируется на других особей, а, наоборот, служит ориентиром для всех остальных, то такая особь является доминантом.

## **1.6. Механизмы обеспечения социального взаимодействия**

Рассмотрим теперь вопрос о базовых механизмах, которые определяют типы социального поведения и приведенные выше соответствующие принципы социальной организации. Соответствие базовых механизмов поведения основным типам социального поведения приведено в Табл. 1.2. Здесь стрелки показывают своего рода градацию видов агонистического поведения – от непосредственного нападения до его более "мягких" форм и проявлений.

Табл. 1.2. Типы поведения и механизмы их реализации

Типы поведения	Механизмы поведения
Контагиозное (заразное) поведение	1. Коммуникативные сигналы

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

На самом деле, Табл. 1.2. является в определенном смысле условной, вариабельной. Так, остается открытым вопрос, можно ли считать подражательное поведение базовым по отношению к контагиозному. Как будет видно дальше, эти виды поведения реализуются совершенно разными механизмами. Более того, подражательное поведение – значительно более сложная форма, требующая наличия развитой когнитивной архитектуры агента.

Рассмотрим далее механизмы поведения, которые обеспечивают поддержание структуры в группе (для анонимных и персонифицированных сообществ), Табл. 1.3.

Табл. 1.3. Механизмы поддержания структуры групп

<b>Анонимные группы</b>	<b>Персонифицированные группы</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Киноприсис</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>

Пометка "ФКД" означает так называемые *фиксированные комплексы действий*. Очень важно, что значение ФКД бывает понятно всем членам данного вида без

специального обучения [Зорина, Полетаева, Резникова, 2002]. Несколько позже мы рассмотрим вопрос ФКД подробнее.

Дадим краткие комментарии к приведенным в таблицах механизмам.

**Коммуникативные сигналы.** Важнейшим, качественно новым в социальном поведении механизмом является наличие сигналов, направленных на изменение поведения других членов группы. Это так называемые *коммуникативные сигналы* [Ительсон, 2002]. В простейшем случае такие взаимоотношения основаны на стремлении 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* [Тинберген, 1993].

**Симпатическая индукция** (*заразное* или *контагиозное* поведение). Простейший тип сотрудничества, реализация принципа "делай, как я" [Тинберген, 1993]. 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 настроя и, как следствие, возникновении врожденной двигательной реакции. 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* [Сотская, 2003]. Служат для поддержания стада или стаи как устойчивого целого и обеспечения определенной *синхронизации* их деятельности.

**Кинопсис.** Согласованная реакция на биологически значимые сигналы, которые могут иметь разную модальность [Зорина, Полетаева, Резникова, 2002]. Например, у муравьев это, прежде всего, "язык поз", т.е. восприятие в качестве сигнала характерных движений других особей одной общиной [Захаров, 1978].

**Агрессия.** Один из основных механизмов в поддержании структуры сообщества. Основные функции внутривидовой агрессии – это обеспечение изоляции группы в пределах одной популяции путем противодействия 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, составляют *агонистическое поведение*, т.е. комплекс 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*" [Зорина, Полетаева, Резникова, 2002].

**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.

## 1.7. Эусоциальные насекомые

Прежде чем сформировать окончательный перечень базовых механизмов, которые определяют принципы социальной организации, необходимо рассмотреть вопрос выбора наиболее подходящего объекта для 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. Более строго под эусоциальной группой, согласно Уилсону [Уилсон, 2020], понимаются группы с высоким уровнем кооперации и разделения труда, где некоторые специализированные особи размножаются меньше, чем другие. У общественных видов социальная организация характеризуется следующим признаками [Зорина, Полетаева, Резникова, 2002]:

1. Репродуктивная дифференциация в группе: одни особи размножаются, а другие – рабочие особи – бесплодны.
2. Коопeração между членами группы, т.е. совместное добывание пищи, выкармливание потомства, строительство, защита гнезда и т.п.
3. Преемственность 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.) [Ительсон, 2002]. Хотя на самом деле их профессиональная кастовость не мешает муравьям некоторых видов менять в случае необходимости свою профессию [Захаров, 2015].

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 признаков, 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. Персонификация 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).

Использование различных комбинаций этих механизмов позволит моделировать различные уровни социализации у группы роботов. Реализация полного перечня перечисленных механизмов и условий (с адаптацией к эмоциональной составляющей роботов, как базовому "физиологическому" уровню организации агента, о чем мы будем говорить ниже) позволит отнести группу (совокупность) роботов к социальной группе (сообществу) 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 Табл. 1.4.

Табл. 1.4. Итоговый перечень механизмов социального поведения

	<b>Тип сообщества</b>		<b>Механизмы поведения</b>
<b>Соиум</b>	<b>Анонимные сообщества</b>	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.
	<b>Индивидуализированные сообщества</b>	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 лидера, например).
	<b>Эусоциальные Сообщества</b>		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 развитие и усложнение типа сообщества. 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.

Итак, был определен итоговый перечень механизмов, обеспечивающих социальное поведение, а также представление о том, что как с технической, так и с методологической точек зрения наиболее целесообразно выбрать в качестве объекта изучения и моделирования эусоциальные сообщества. Приводящийся ниже материал, несмотря на свой сугубо биологический характер, крайне важен для понимания сути настоящей работы, т.к. опираясь именно на него, на описанную феноменологию, и будут строиться модели и методы взаимодействия искусственных агентов.

## Муравьи *Formica*

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 их в том виде, как они есть, без исторической ретроспектизы.

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 [Длусский, 1967] и Захарова [Захаров, 1978], [Захаров, 2015].

**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.

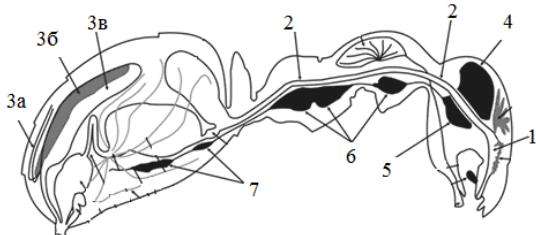
**Муравьиные тропы.** Ведут к кормовым участкам. Тропы ухожены, их протяженность – десятки и сотни метров, ширина – до метра. Тропы действуют иногда десятки лет. Совокупность троп составляет охраняемую территорию данного муравейника. Кстати, считается, что муравьи *Formica* свои дороги запахом (феромонами)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

**Ориентация и память.** Муравьи могут ориентироваться по солнцу (поляризация солнечного света). 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 возникают временные связи. Временные связи образуются у муравьев в грибовидных тела, 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. 1.6, [Длусский, 1967].



*Rис. 1.6. Муравей рода *Formica*. 1 – глотка; 2 – пищевод; 3 – ядовитая железа; 4 – надглоточный ганглий; 5 – подглоточный ганглий; 6 – грудные нервные узлы; 7 – брюшная нервная цепочка [Длусский, 1967]*

**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 расстоянием 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. Впрочем, зрение – это отдельный вопрос, в котором до сих пор есть много спорного.

**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. Изменение 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.

### **Феноменология социального поведения муравьев**

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

1. Разведение тлей. Муравьи активно заботятся о тлях: защищают от вредителей, переносят на наиболее подходящие участки растения и пр.
2. Собирательство. Муравьи собирают семена различных трав и хранят их в специальных сухих хранилищах своих гнезд.
3. 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.
4. Выращивание грибов. Муравьи некоторых видов устраивают в своих муравейниках грибные плантации для снабжения высококалорийной белковой пищей.
5. Охрана своих плантаций от вредителей и паразитов. Для борьбы с грибками-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 являются их физиологическое состояние и психические наклонности. Например, более инициативные, с быстрой реакцией муравьи становятся разведчиками или охотниками, крупные – солдатами, а особи, имеющие замедленную реакцию и минимум любознательности, – обслуживающими рабочими и фуражирами. Это – так называемый кастовый полиграфизм. 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 работников (молодых индивидов) 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 начинает 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.** Если поликалия не спасает от перенаселения, 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 сохраняются 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 федерации значительно выше, чем обособленной колонии. Причем все это достигается одними и теми же средствами – обменами.

**Примечание.** Иногда выделяют такую организационную структуру, как коалиции гнезд. Коалиция – это сложная поликалическая система, в которую входят муравейники разных размеров с выраженной дифференциацией функций между ними. На уровне коалиции начинается разделение используемой муравьями территории на зоны гнездования и фуражировки [Горюнов, 2013].

### Муравьи с технической точки зрения

Исходя из приведенного выше краткого и, естественно, поверхностного описания функционала особей и некоторых феноменов их общественного поведения, становится очевидным некоторый начальный перечень задач. При этом помимо реализации механизмов социального поведения необходимо разобраться 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. 1.7.



Рис. 1.7. Перечень основных задач по созданию технического аналога 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, Рис. 1.8.



*Рис. 1.8. Задачи и распределение "зон ответственности"*

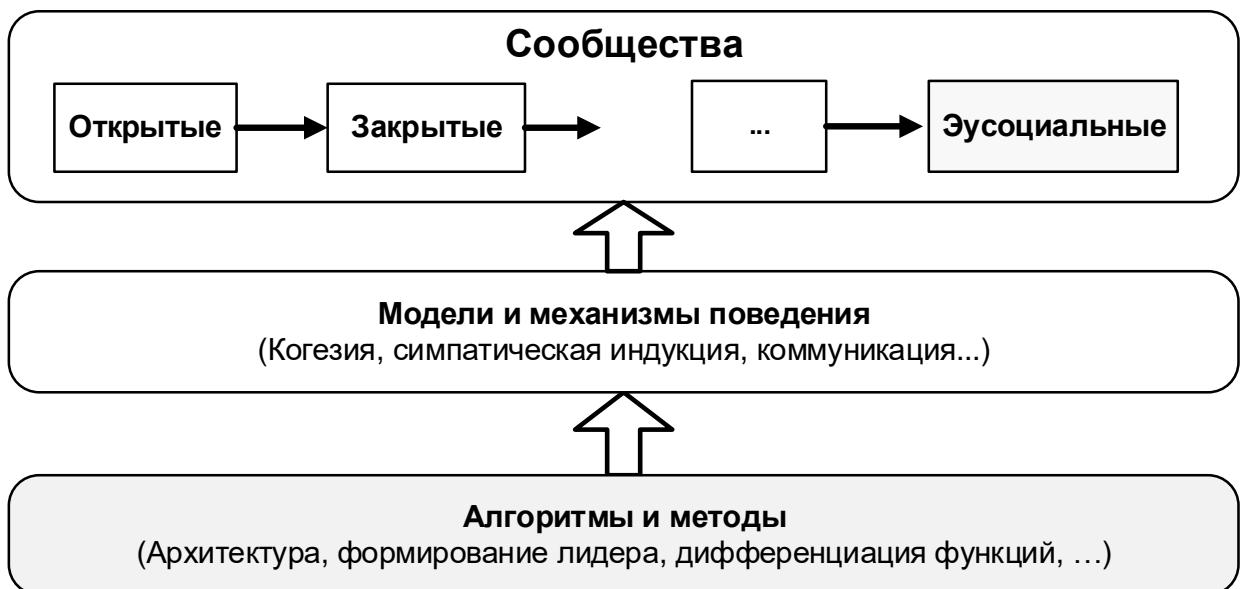
В определенном смысле можно сказать, что предметом "классической" робототехники является, прежде всего, нижний, базовый уровень, включающий как аппаратные решения (в частности то, что на Рис. 1.8 обозначено как "железо"), так и методы реализации моторных и двигательных функций. В свою очередь, зона ответственности 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. Сегодня же, 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.** 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. 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 существующую поведенческую программу в зависимости от ситуации.

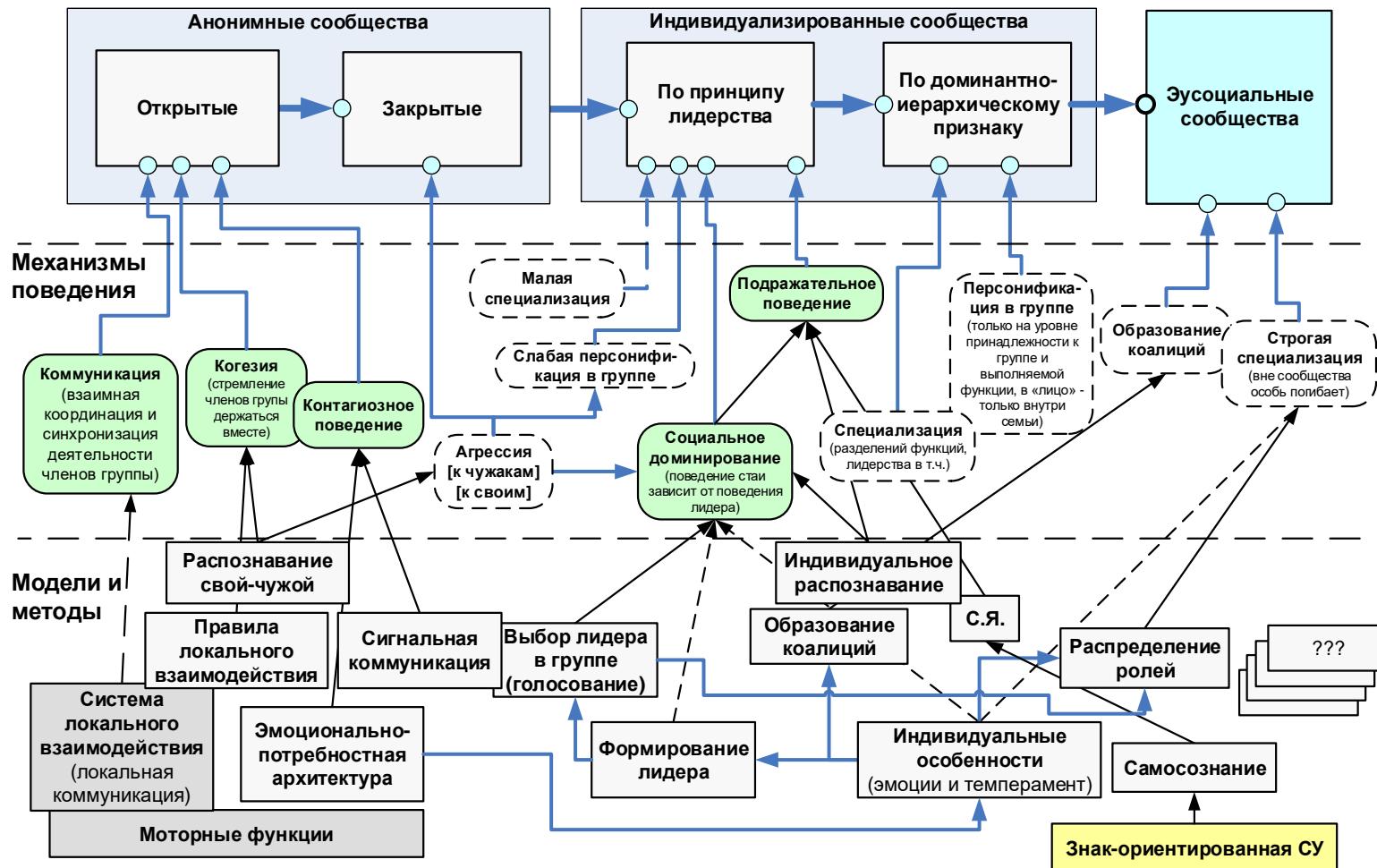
### **1.8. Модели и методы реализации социального поведения**

Мы подошли к центральной, ключевой схеме исследования. Эта схема определяет, какие модели и методы могут реализовать основные механизмы поведения, которые, в свою очередь, задают типы сообществ. На Рис. 1.9,а показана общая, а на Рис. 1.9,б – более детальная схема, определяющая цель исследования.



a) общая схема

### Типы сообществ



б) детальная рабочая схема

Рис. 1.9. Модели и методы реализации социального поведения

Приведенный 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 эмерджентных свойств групп роботов на основе реализации моделей социального поведения. Схема не только фрагментарна, но и вариабельна. Например, элемент, названный "Агрессия", как будет показано далее, видоизменится, раздробившись на свои базовые компоненты, и превратится в некое абстрактное, условное понятие.

**Замечание 1.** Рассматриваемые в этологии модели и виды поведения (родительское, брачное, агрессивное, контагиозное и пр.) в зависимости от используемой систематизации, – это, конечно, некая условность, своего рода проекция разнообразия проявлений поведенческих реакций и процедур на восприятие наблюдателя, попытка внешней классификации. Ярким примером является т.н. агрессивное поведение. Вряд ли можно говорить о существовании некоторого отдельного блока, модели или механизма (вплоть до участка гена), ответственного за агрессию. То, что называется агрессией, – это лишь наша внешняя оценка поведения особи. Причем оценка, зависящая от контекста. Подробнее о той же агрессии будет говориться в следующих разделах.

И еще одно замечание, которое необходимо сделать в силу того, что зачастую суть парадигмы моделей социального поведения иногда понимается несколько механистически.

**Замечание 2.** Упомянутые "правила" или свойства, определяющие необходимые условия для образования социальных сообществ – это не объект для реализации. Та же когезия – это некоторое наблюдаемое свойство. Основная задача заключается в том, чтобы найти некие базовые механизмы, определяющие такое поведение, которое мы называем проявлением когезии. И, возможно, создать методологию определения таких базовых механизмов. Собственно, именно этому и посвящено настоящее исследование.

### 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 лежать в основу схемы на Рис. 1.9, т.е. моделей и методов реализации социального поведения. Речь идет, прежде всего, о задачах согласованного движения и рекогносцировки. В качестве одного из первых реальных проектов в этой области можно отметить работы 2000 года MARS (Multiple Autonomous Robots Laboratory,

Пенсильванский университет) [MARS, 2015]. В них отрабатывались 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* [Nissan, 2009]. 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 для 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* [SwarmRobot, 2016]. На самом деле, однако, более детальный анализ предлагаемых в этих работах способов решений показывает их непригодность для решения 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.

В следующих главах будут рассмотрены наиболее существенные из этих моделей и методов, начиная с тех, которые описывают устройство индивида, и заканчивая моделями их взаимодействия.

## 1.9. Выводы к главе 1

Основными выводами этой главы являются следующие положения:

1. Анализ состояния работ в области групповой робототехники показывает, что эффекты самоорганизации, появление эмерджентных свойств, способность получения нового качества решения сложных задач совокупностью простых устройств и пр., – все это в основном является декларациями, сводящимися на практике, по большей части, к решению задач совместного движения. Задачи, решаемые сегодня групповой робототехникой, имеют частный, фрагментарный характер, не претендуя на какую-либо целостность или универсализм.

2. Было сделано предположение о том, что необходима разработка некоторого единого, целостного методологического базиса или подхода, позволяющего рассматривать задачи совместного функционирования групп роботов не фрагментарно, а комплексно. В качестве такого базиса было предложено рассмотреть модели социальной организации, подобные тем, что наблюдаются в живой природе. Основная идея парадигмы моделей социального поведения (МСП) заключается в том, чтобы рассматривать принципы организации сообществ роботов как некоторый универсальный адаптационный механизм.

3. Были рассмотрены различные типологии социального поведения в живой природе. Особое внимание уделялось принципам организации т.н. эусоциальных (истинно социальных) сообществ. Были определены основные механизмы, реализация которых может создать основу для формирования социумов технических устройств – роботов. Или, по меньшей мере, реализовать элементы социальной организации в группах роботов для получения синергетических или системных эффектов.

4. Была предложена схема организации социальных сообществ, нижний уровень которой содержит перечень методов, моделей и алгоритмов, необходимых для реализации тех или иных моделей и феноменов социального поведения, а верхний уровень соответствует итоговому требуемому уровню организации социума.

5. Реализация моделей и методов социального поведения не может не основываться на некой базовой содержательной модели индивида и формируемых им сообществ. В качестве такой модели были выбраны муравьи рода *Formica*.

## ГЛАВА 2. УСТРОЙСТВО ИНДИВИДА

**О терминологии. Агенты, роботы и аниматы.** Здесь следует сделать замечание относительно терминологии. В дальнейшем будут использоваться термины "робот" и "агент". Отчасти они будут синонимичны. В том случае, когда следует подчеркнуть "аппаратные", "технические" аспекты, будет использоваться термин "робот". Когда же нас больше будет интересовать некоторое абстрактное, модельное поведение, будет использоваться термин "агент". Кроме того, существует достаточно удобное понятие "анимат".

Обычно агент – это некоторая абстрактная, программная сущность. П. Маес определяет автономных агентов как "вычислительные системы, которые населяют некоторую сложную динамическую среду, ощущают и действуют автономно в этой окружающей среде, реализуя множество своих целей и задач, для которых они разработаны" [Maes, 1995]. С другой стороны, у С. Рассела и П. Норвига агент понимается как некоторая сущность, воспринимающая среду с помощью своих датчиков и воздействующая на эту среду своими эффекторами [Russell, Norvig, 2010]. При этом разделяются агенты-роботы и программные агенты. Робот – это, обычно, аппаратный комплекс.

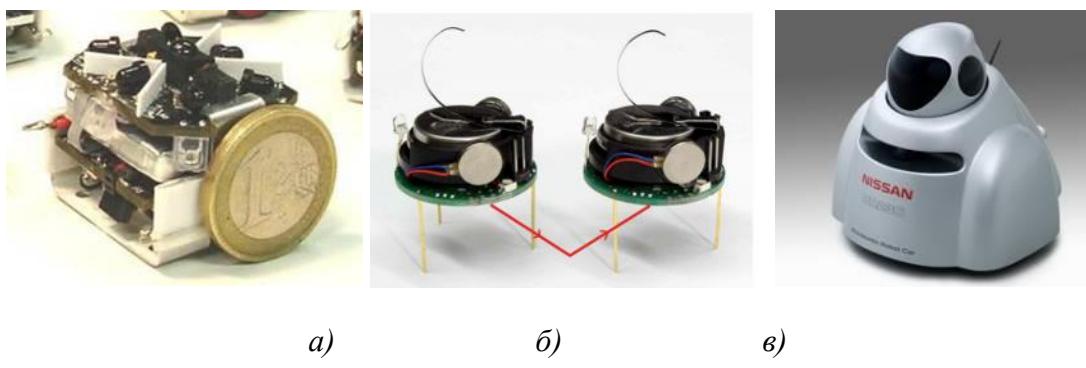
**Примечание.** Нельзя не отметить определение агента по Марвину Минскому, данному им в 1986 г.: Агент – это любая совокупность элементов, которая, как предполагается, способна действовать как единое целое, вне зависимости от функций ее элементов [Минский, 2018].

Поэтому, чтобы подчеркнуть биологическую инспирированность исследуемых принципов и механизмов, целесообразно использовать термин "анимат" – искусственную модель животного. С. Вильсон в [Wilson, 1986] определяет четыре базовые характеристики такого простого животного, однако мы не будем останавливаться на них. Отметим лишь, что речь идет о том, что это животное живет в мире сенсорных сигналов; оно способно к действиям, изменяющим эти сигналы; ряд сигналов является значимым для животного; деятельность животного направлена на оптимизацию уровня некоторых сигналов. Интересно, что в работе [Wilson, 1987] Вильсон говорит о том, что "мы также применяем неформально термин *анимат* к животным и самим автономным роботам". Здесь следует отметить, что одной из первых деклараций о создании некой виртуальной сущности, моделирующей организацию поведения, является работа М.М. Бонгарда с коллегами [Бонгард, Лосев, Смирнов, 1975]. В ней описывалась "попытка построить

модель, воспроизводящую в грубых чертах поведение человека или хотя бы «разумных» животных". Важно, что проект "Животное" также во многом опирался на проблему распознавания и обучения, описанную в [Бонгард, 1967]. Сегодня в нашей стране развитие теории аниматов и адаптивных агентов относится, прежде всего, к школам В.Г. Редько (см., например, работы [Редько, 2012], [Редько, 2015]), К.В. Анохина и их коллег [Анохин и др., 2002].

## 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 [Churaman, 2010]. 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* [Ducatelle и др., 2011a], [Ducatelle и др., 2011b], [SwarmRobot, 2016], и предельно простые и дешевые устройства проекта *Kilobot* (разработчики – Группа исследования самоорганизующихся систем Гарвардского университета и Политехническая школа Лозанны, [Rubenstein, 2014]), и весьма серьезные исследовательские роботы *EPORO* фирмы *Nissan* [Nissan, 2009], Рис. 2.1.



*Рис. 2.1. а) проект SwarmRobot (<http://www.swarmrobot.org/>), б) Kilobot (<http://www.robotpark.com/academy/100-kilobots-swarm-together-at-harvard-31012/>), в) робот EPORO (<https://www.cnet.com/roadshow/pictures/nissan-eporo-robots-exhibit-fishy-behaviour/>)*

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.

### **2.1.1. Центральная нервная система**

Нейронов надглоточного ганглия – центральной нервной системы 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 [Карпов, Вальцев, 2009], [Karpov, Valtsev, 2011] 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, коммуникации, 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 [Бернштейн, 1997]. По такому же принципу, используя хорошо изученный нейрофизиологами механизм центральных моторных программ, можно строить и системы управления роботами [Добрынин, Карпов, 2007]. В частности, в [Карпов, 2007] 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. Кроме того, и это крайне важно, концепция центральных моторных программ позволяет использовать для их реализации механизм автоматного управления. О многоуровневом автоматном управлении будет говориться ниже, в разделе 2.4.

### **2.1.2. 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, 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 [Garnier и др., 2005] или стайное поведение [Карпов, 2012], необходима психологическая дифференциация роботов, как минимум определяющая различие в их поведении. В следующем разделе рассматривается вопрос об эмоциях в робототехнике, описывается механизм "эмоциональной" системы управления роботом. Далее описывается модель системы управления, основанной на понятии темперамента, а также предлагается некий формализм, описывающий особенности индивидуального и коллективного поведения роботов на основе автоматной модели темперамента.

## **2.2. Эмоции и темперамент роботов**

### **2.2.1. Эмоции в робототехнике**

Имитация физиологических процессов и феномены высшей нервной деятельности давно находятся в сфере интересов робототехники. Эмоции и темперамент занимают особое место среди этих явлений. Действительно, как эмоции, так и темперамент – это одни из основных механизмов оценок поведения высокоорганизованных организмов. Кроме того, вполне естественен вопрос их применимости к описанию и оценке поведения технических устройств.

Обычно, эмоции и другие подобные психические явления – объекты интереса искусственного интеллекта (ИИ) и когнитивных наук. В виде некоторого обобщения мы можем сказать, что ИИ интересуется эмоциями и темпераментом как внутренними процессами. В противоположность ИИ, робототехника обычно рассматривает их с точки зрения внешних проявлений, т.е. *выражения* эмоций. В любом случае, действительно эмоциональное поведение рассматривается крайне редко.

С одной стороны мы имеем множество научно-популярных работ, таких, как, например, [Evans, 2004], где представлены некоторые общие соображения о роли эмоций в технических системах. Например, рассуждения на тему "действительно ли робот боится?", когда он обнаруживает некоторые препятствия и обходит их, и пр. В некотором смысле, эта точка зрения очень близка к подходу, описанному В. Брайтенбергом в [Braitenberg, 1984]. Речь идет о некоторой гипотетической мобильной платформе (тележке) с очень простой внутренней структурой. Брайтенбергская тележка имела примитивные датчики и двигатели (исполнительные органы). В зависимости от того, как были соединены датчики и двигатели, тележка демонстрировала разнообразное поведение. Используя такие элементы, как различные пороговые устройства, поведение тележки становилось более сложным и интересным. Очень важный аспект заключается в том, что Брайтенберг использовал язык психологии для описания поведения тележки. Он описывал поведение тележки в терминах страха и агрессии, трусости и любви, любопытства и жажды исследования и т.д.

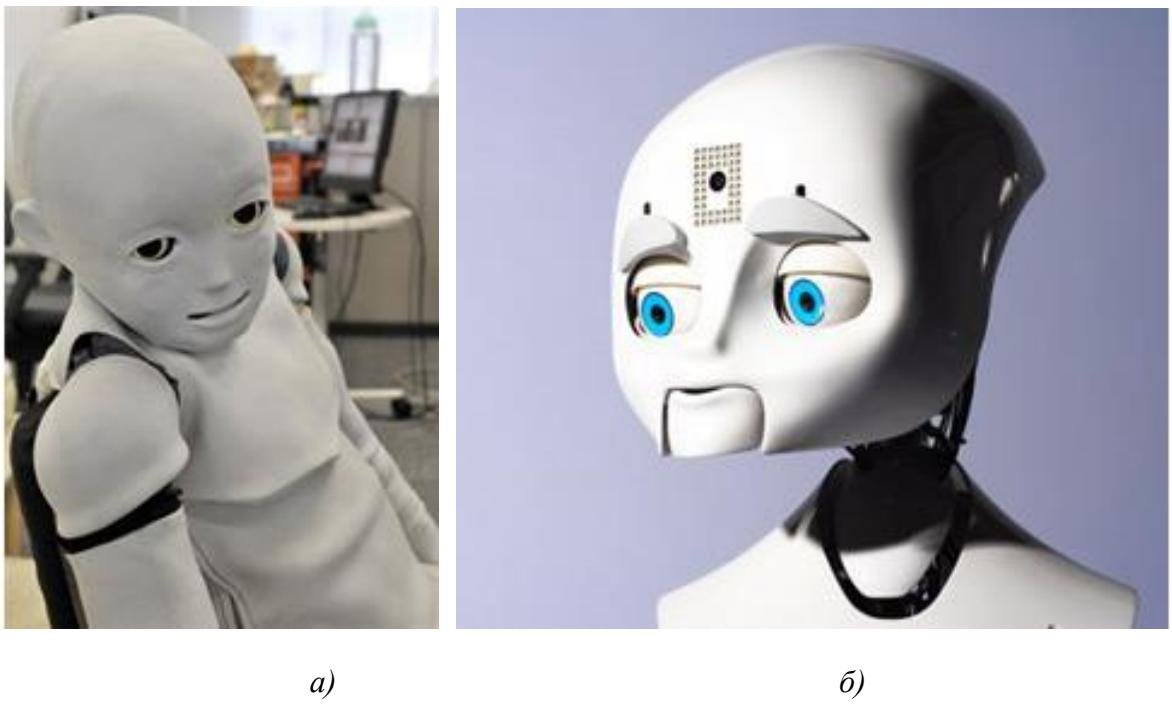
С другой стороны, эмоции важны с точки зрения создания интерфейса между человеком и роботом. Например, одной из первых серьезных работ в этой области является робот "Kismet", описанный в [Breazeal, Brooks, 2005]. Этот робот может изображать серию эмоций благодаря своим подвижным векам, глазам и губам. Но эти эмоциональные способности созданы для отражения внутреннего состояния робота, и, подчеркнем, основная функция этого выражения эмоций – обеспечение дружественного человеко-машинного интерфейса. Особенно актуальная эта проблема для коллаборативной робототехники. Так, в работе А. Ющенко [Yuschenko, 2015] предлагается рассмотреть прямую и обратную задачи «динамики эмоций», а именно – задачу воспроизведения выражения человеческого лица на искусственном лице антропоморфного робота и задачу оценки эмоционального состояния реального человека по выражению его лица. Другой подход представлен в [Hirth, Berns, 2008]. Хирс и Бернс предложили гуманоидного робота *ROMAN* (*Robot human interaction machiNe*) с архитектурой, базирующейся на эмоциях. Основная идея состоит в том, что эмоциональное состояние робота генерируется стимулами.

Имеется и совершенно иной – формально-математический – подход к определению и самих эмоций, и их влиянию на поведение роботов. Так, сугубо математическое определение человеческих, как пишут авторы, эмоций приведено в работах [Пенский, Черников, 2013] и [Пенский, Шарапов, Ощепкова, 2018]. При этом авторы заявляют о принципиальном абстрагировании дефиниций от содержательной стороны вопроса. К сожалению, такой принципиально абстрактный и формальный характер моделей делает

весьма затруднительным их реализацию в реальных технических системах для решения практических (с точки зрения осмыслинности поведения) задач.

Взаимодействие человека и робота может быть рассмотрено даже через эстетическое восприятие. Например, этот вопрос обсуждался в [Buiu, Popescu, 2011]. В [Hollinger и др., 2006] был описан робот RWI. В этом исследовании использовано моделирование эмоций для определения взаимодействия робота с человеком в цветочувствительных терминах. Взаимодействие с человеком приводит к изменению темперамента робота: при распознавании цвета текущее состояние робота изменяется в направлении соответствующего эмоционального экстремума. Этот механизм работает с использованием специальных карт, определяющих соответствие между распознанным цветом и эмоциональным состоянием.

На Рис. 2.2 приведены примеры реализации "внешнего очеловечивания".



*Рис. 2.2. Примеры "внешнего очеловечивания"*

- a) Проект CB2 (Япония, Osaka University). Вес – 33 кг., высота – 1,3 м. 51 пневматическим привод, микрофоны, видеокамеры, 200 тактильных датчиков (<https://www.engadget.com/2009/04/06/cb2-child-robot-returns-smarter-creepier-than-ever/>)*
- б) Проект NEXI (Массачусетский технологический институт, США) (<http://robotic.media.mit.edu/portfolio/nexi/>)*

Однако нас интересует другой аспект эмоций и темперамента. Мы имеем в виду их влияние на поведение робота. Как будет показано ниже, один из наиболее важных аспектов имитации этих психологических феноменов – их использование для группы

роботов. В этом исследовании предлагается архитектура системы управления роботом, реализующая механизмы эмоций и темперамента в простой и естественной для технической системы форме.

### **2.2.2. Эмоционально-потребностная модель**

Основной интересующий нас вопрос – это влияние эмоций на поведение роботов. Как правило, поведенческий аспект эмоций рассматривается как наличие некоторых эмоций роботов в уже готовой форме. Так, в [Kuremoto и др., 2010] модель эмоций робота использовала факторы "удовольствие" и "раздражение" для установления набора поведенческих правил для автономных роботов. Например, когда препятствие появлялось в поле зрения робота, поведенческие правила приводили к переходу от "удовольствия" к "раздражению". Основная идея заключалась в том, что информация о локальной среде, окружающей робота, меняла ориентацию вектора эмоций, включающего два измерения – "удовольствия" и "раздражения", что являлось причиной движения роботов. Робот сближается с роботами, для которых "удовольствие" появляется в поле зрения, и удаляется от оных в обратном случае; "градус" удовольствия уменьшался, когда наблюдалось препятствие, и т.д. Таким образом, эмоции порождались прямым наблюдением.

В настоящей работе предлагается несколько иной подход. В [Карпов, 2010], [Карпов, 2014] рассмотрена реализация механизма эмоций мобильного робота на базе гибридной нейро-продукционной системы управления. В качестве основной была выбрана т.н. *Информационная теория эмоций* В.П. Симонова [Симонов, 1982], [Simonov, 1991]. Эта теория имеет базовое предположение, что эмоции являются оценкой текущей потребности (ее качества и ценности) и возможности ее удовлетворения. Мозг оценивает эту возможность на основе генетической предрасположенности и ранее полученного индивидуального жизненного опыта. В общем виде отношение этих факторов описывается качественным (оценочным) выражением:

$$E=f(N, p(I_{need}, I_{has})) \quad (2.1)$$

где  $E$  – эмоция, ее величина и знак (качество);  $N$  – 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 удовлетворения потребности;  $I_{has}$  – информация об имеющихся у субъекта средствах, ресурсах и времени.

Это, главным образом, качественная формула, иллюстрирующая принцип формирования положительных и отрицательных эмоций от различных воздействий.

Мы можем объяснить выражение (2.1) следующим образом: индивид оценивает свои текущие потребности  $I_{need}$ , или то, что он должен сделать (поесть, найти еду, уклониться от препятствия, убежать и т.д.). Затем он оценивает индивидуальные возможности удовлетворения этих потребностей  $I_{has}$ . Различие между потребностями и возможностями определяет эмоциональную оценку текущей ситуации. Если он имеет некоторые потребности, и при этом возможности для их удовлетворения достаточны, он получает положительную эмоциональную оценку. В противном случае его эмоции негативны.

Подчеркнем, что, в отличие от чувств, эмоции относятся к ситуации, а не к объекту. Чувства направлены на некоторый абстрактный или реальный объект (любить что-либо, бояться чего-либо и т.д.). Напротив, эмоции, такие, как удовольствие, удивление или страх отражают оценку ситуации. Таким образом, воздействие эмоций на любое будущее решение опирается на оценку текущей ситуации.

Рассмотрим далее, как этот подход может быть применён для создания архитектуры системы управления агента.

Пусть имеется агент, способный воспринимать сигналы внешней и своей внутренней среды с помощью множества сенсоров, обладающий набором потребностей, а его поведение определяется некоторым множеством правил:

$$Agent = \langle S, N, R \rangle \quad (2.2)$$

Здесь  $R$  – множество продукции,  $N$  – множество потребностей,  $S$  – множество сенсоров.

Предположим далее, что правила  $R$  представлены в MYCIN-подобной форме (см., например, [Джексон, 2001]), т.е. как множество продукции с коэффициентами уверенности:

$$R = \{R_i\} = \{(Cond_1 \ \& \dots \ Cond_k) \rightarrow f_i, (w_i)\}$$

Здесь  $Cond_j$  – конъюнкты условия,  $Cond_j \in [0,1]$ ;  $f_i$  – заключение, т.е. номер выполняемого действия,  $f=1..L$ ;  $w_i$  – коэффициент уверенности  $i$ -го правила,  $w_i \in [0,1]$ ,  $i=1..L$ ,  $L$  – количество действий (поведенческих процедур), которое выполняет агент. Смысл продукции заключается в вычислении оценки  $A_f$  (коэффициент уверенности заключения) того, что будет совершено действие  $f$ .  $A_f$  вычисляется как  $A_f = w_i \min(Cond_k)$ . Множество  $R$  может содержать несколько правил с одинаковым заключением  $f$  (т.н. подтверждающие правила). Тогда итоговый  $A_f$  для подтверждающих правил  $R_i$  и  $R_j$ , дающих оценки  $A_f^i$  и  $A_f^j$  соответственно, определяется как

$$A_f = A_f^i + A_f^j - A_f^i A_f^j$$

Будем считать, что продукции определяют в итоге выполняемые агентом действия, которые могут быть сложными и относиться к категории поведенческих процедур.

Например, правило "принимать пищу" (питаться) может быть представлено как:

**ЕСЛИ "Голоден" ( $S_{hung}$ ) & "Вижу пищу" ( $S_{food}$ ) ТО "Питаться" ( $w_{eat}$ )**

где  $S_{hung}$ ,  $S_{food}$  – коэффициенты уверенности. Тогда коэффициент уверенности  $A_{eat}$  для заключения правила определяется как  $A_{eat} = \min(S_{hung}, S_{food})$ .

Введем далее эмоциональный компонент. В каждый момент времени субъект может иметь несколько потребностей, с каждой из которых связана своя частная эмоция. Представим выражение (2.1) в следующем виде:

$$E = N \times (I_{has} - I_{need}) \quad (2.3)$$

где  $E$  – эмоция,  $N$  – сила и качество текущей потребности;  $I_{need}$  – информация о необходимых для удовлетворения этой потребности средствах, ресурсах и времени;  $I_{has}$  – информация об имеющихся у субъекта средствах, ресурсах и времени. Это – тоже некоторая оценочная, качественная формула, в которой фигурирует разность между тем, что необходимо, и тем, что имеется реально.

Предположим, что каждая продукция  $R_i$  задается указанием базовой потребности  $N^i_{det} \in N$ ,  $N^i_{det} \in [0,1]$ , множеством подтверждающих правила условий  $\{Cond_i\}$  и действием  $f^i$ , которое может быть инициировано при выполнении условия:

$$R_i: (N^i_{det}, \{Cond_i\}) \rightarrow f^i, (w_i), f^i = 1..L \quad (2.4)$$

Важно, что вычисление  $A_f$  заключения – это еще не запуск соответствующей процедуры. Это – пока лишь оценка готовности совершить действие. Таким образом, множество продуктов  $R$  порождает вектор коэффициентов уверенности выполняемых действий  $A$ .

Вернемся к эмоциональному компоненту, см. (2.3). Пусть  $I_{need}$  определяется как вектор коэффициентов уверенностей заключений требуемых (желаемых) правил-действий ( $I_{need} = A$ ), а  $I_{has}$  определяется как вектор актуально исполняемых в данный момент времени действий:  $I_{has} = A^{actual}$ ,  $A_i^{actual} = 1$ , если  $i$  – номер актуального действия ( $A_i^{actual} \in \{0,1\}$ ). Таким образом, вычисляя  $A_i$  для всех правил в текущий момент, мы можем определить эмоциональные оценки  $E_i$  для всех действий (частные эмоции):

$$E_i = k_{em} (A_i^{actual} - A_i), i=1..L \quad (2.5)$$

Здесь  $k_{em}$  – некоторый коэффициент, введенный в силу того, что потребности  $N$  используются при вычислении вектора  $A$ , см. (2.4). Очевидно, что если  $A_i^{actual} - A_i < 0$  (ситуация, когда не выполняется желаемое действие  $i$ , т.е.  $A_i > 0$ ,  $A_i^{actual} = 0$ ), то у агента возникает частная отрицательная эмоция. Выражение (2.5) определяет векторный

характер эмоций, т.е. с каждым действием связана своя частная эмоциональная оценка. На понятийном уровне это интерпретируется следующим образом: исходя из имеющихся потребностей и значений сенсоров, система определяет веса действий, которые можно было бы совершить в данный момент времени. Это – требуемые (желаемые) действия. Однако, как уже говорилось, агент может совершать лишь одно – актуальное – действие из множества возможных. Если желаемое действие совпадает с актуальным, то с этим действием связывается положительная эмоция. В случае несовпадения – отрицательная.

Полной оценкой эмоционального состояния робота является величина

$$E = \sum_{i=1}^M E_i \quad (2.6)$$

Следовательно, эмоции определяют оценку текущей ситуации в целом. С другой стороны, величины  $E_i$  определяют "локальные", "частные" эмоции.

**Примечание.** Согласно (2.6) действительно получается, что эмоции подавляют друг друга. Итоговая эмоция  $E$  – это просто индикатор состояния, а на поведение влияют частные эмоции  $E_i$ .

**Шлюзы.** Для учета влияния эмоций на поведение системы введем дополнительные элементы – множество шлюзов  $G$ . Они нужны в силу того, что эмоциональная оценка действия (частная эмоция) не может воздействовать на сенсорику и тем более – на потребности. Шлюзы – это элементы, которые ставятся во взаимно однозначное соответствие сенсорам. Выходное значение шлюза  $G_i$  определяется как функция от значения соответствующего сенсора  $S_i$  и множества эмоциональных состояний правил  $Es_i$  (т.е. множества эмоциональных сигналов от процедур, с которыми связан шлюз):

$$G_i = G_i(S_i, Es_i), S_i \in S, Es_i \subseteq R \quad (2.7)$$

Для каждого сенсорного элемента  $S$  создаётся шлюз  $G$ , который определяет правило сочетания сенсорных восприятий и эмоциональных состояний. Например, для шлюза  $G_i$  оно может выглядеть так:

$$G_i = k_{ext} \left( S_i \oplus \sum_{j \in Es_i} E_j \right) \quad (2.8)$$

Здесь  $k_{ext}$  – константа (коэффициент возбуждения, определяющий значимость показателя  $G$  для правил), а  $\oplus$  – некоторый аналог операции сложения, ограничивающий результат диапазоном  $[0,1]$ , например, операция алгебраической суммы в нечеткой логике:

$$x \oplus y \equiv x + y - xy \quad (2.9)$$

Фактически, шлюз определяет то, что можно назвать “значимостью” для данного правила в текущий момент времени (контекстуальный вес правила).

**Примечание.** Шлюз – это элемент для создания и учета обратной эмоциональной связи. У каждого сенсора – соответствующий шлюз, который нужен для того, чтобы отвечать и за сенсорный сигнал, и быть приемником сигнала частной эмоции. Одна из задач шлюза – формирование своего рода инерционности: сигнал уже пропал, а шлюз еще активен. Именно сигнал шлюза поддерживает какое-то время активность правила.

Таким образом, подтверждающие условия  $Cond_i$  становятся функциями от значений потребностей и значений шлюзовых элементов:

$$Cond_i = F_i(N_i, G_i), N_i \subseteq N, G_i \subseteq G \quad (2.10)$$

В итоге функционирование эмоционально-потребностной схемы поведения агента выглядит так:

1. Вычисление вектора коэффициентов уверенности заключения правил:

$$A = R(N, S, G) \quad (2.11)$$

2. Формирование вектора актуально выполняемых действий  $A^{actual}$ , определяющего единственное выполняемое в данный момент дискретного времени  $t$  действие  $nproc$ :

$$nproc = \arg \max Y_i \quad (2.12)$$

$$Y_i(t) = A_i - k_{fb} \sum_{j \neq i}^M Y_j(t-1) \quad (2.13)$$

В выражении (2.12) для вычисления  $nproc$  используется вектор  $Y(t)$ , введение которого обусловлено необходимостью стабилизации выходного вектора:  $|Y|=L$ ,  $Y_i(0)=0$ ,  $i=1..L$ . Фактически, это – низкочастотный фильтр для вектора  $A$ . Именно значения  $Y$  определяют итоговый результат – номер запускаемой процедуры. В итоге:

$$A_i^{actual} = \begin{cases} 1, & i = nproc \\ 0, & i \neq nproc \end{cases} \quad (2.14)$$

3. Вычисление вектора эмоций  $E$ . Величина и знак эмоции  $E$  определяется как разность между тем, какие действия робот мог совершить в зависимости от текущей ситуации (исходя из имеющегося состояния сенсоров и потребностей), и вектором фактического выхода  $A^{actual}$ :

$$E = k_{em}(A^{actual} - A) \quad (2.15)$$

Напомним, что  $k_{em}$  – некоторый коэффициент, а потребности  $N$  “ушли” в процедуру вычисления вектора  $A$ .

4. Запуск поведенческой программы *nproc*, соответствующей максимально обусловленному действию.

Соответствующий алгоритм определения действия (номера поведенческой процедуры) приведен ниже:

```
-- Шаг1. Вычисление выходных значений вентильных элементов G
for i in dim(G) do
     $G_i \leftarrow k_{ext}(S_i \oplus (\text{sum } (e_j) \text{ for } j \text{ in } Es_i))$ 
-- Шаг2. Вычисление вектора коэффициентов уверенности заключений правил
for i in L do
     $A_i \leftarrow \text{evaluate}(R_i)$ 
-- Шаг3. Выходные значения Y. Реализация принципа "победитель забирает всё"
for i in L do
     $Y_i \leftarrow A_i - k_{fb} * (\text{sum}(Y_j) \text{ for } j \neq i)$ 
-- Шаг4. Aactual – вектор фактически выполняемых процедур
nproc  $\leftarrow \arg \max(Y)$ 
for i in L do
     $A^{actual}_i \leftarrow 1, \text{ если } i = nproc, \text{ иначе } 0$ 
-- Шаг4. Вычисление частных эмоций
e  $\leftarrow k_{em} * (A^{actual} - A)$ 
E  $\leftarrow \text{sum}(e)$ 
-- Шаг5. Возврат искомого значения – номера исполняемой процедуры proc
Return nproc
```

На самом деле, влияние эмоций на совершение действия реализуется как положительная обратная связь между выходным сигналом (текущее действие) и поведенческими правилами. Рис. 2.3 иллюстрирует базовую архитектуру "эмоциональной" (эмоционально-потребностной) управляющей системы.

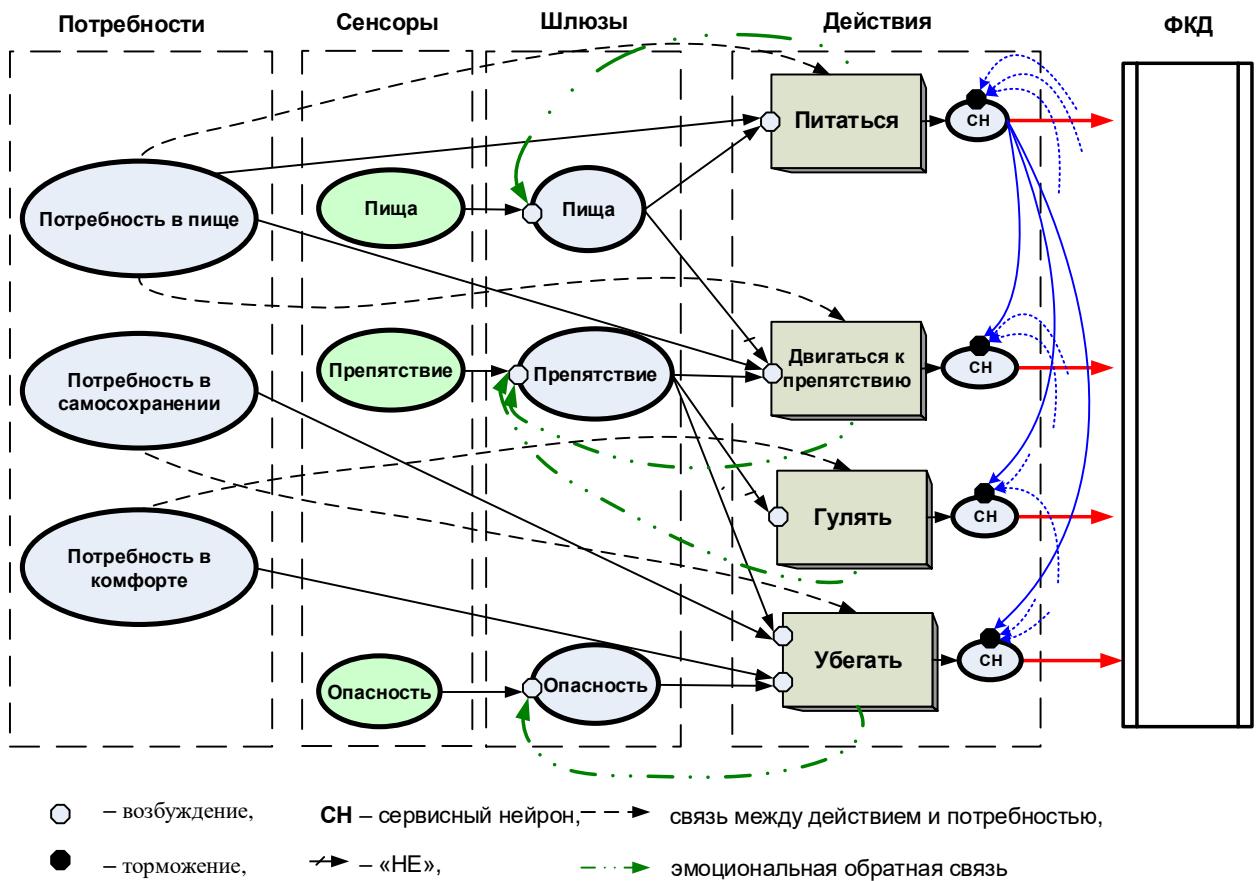


Рис. 2.3. Архитектура эмоционального робота

Блок "Действия" – это набор поведенческих процедур. Каждая процедура активируется сигналами блока "Потребности" и сигналами специального элемента "Шлюз". "Шлюз" – это элемент, который принимает прямой сигнал от сенсоров и сигнал обратной связи от выходных элементов. Каждая выходная процедура имеет свой собственный эмоциональный "вес", согласно выражению (2.5). Этот сигнал является входной величиной для шлюзового элемента. Это означает, что положительные эмоции, ассоциированные с действием  $a_i$ , приведут к возрастанию активности этого действия. Фактически, речь идет о существовании положительной обратной связи. Роль шлюзовых элементов как раз и состоит в том, чтобы учесть влияние эмоциональной обратной связи. Пунктирными линиями (связи между действиями и потребностями) отображается непосредственное влияние потребностей на активацию поведенческих процедур. Например, активность процедуры "Гулять" зависит от потребности в комфорте, хотя в соответствующем правиле активации эта потребность явно не фигурирует.

Роль сервисных элементов СН заключается в определении единственного выходного сигнала – реакции системы. В некотором смысле мы можем рассматривать их как элементы сети Кохонена, действующих по принципу "Победитель забирает все".

**О выходных сигналах.** Выходные сигналы запускают комплексы моторных программ. В живой природе это называется фиксированными комплексами действий (ФКД) – специфичные для каждого вида поведенческие последовательности, форма которых является постоянной и закреплённой генетически. Термины "моторная программа" и "фиксированный комплекс действий" иногда синонимичны. В работе [Matthews, Matthews, 2010] говорится: *"Там, где физиолог или нейробиолог видят предопределенные эндогенные моторные программы, этолог видит фиксированные комплексы действий"*. Важно, что ФКД производятся нейронной сетью и зависят от гормонов, инициирующих эти ФКД.

С практической точки зрения реализация ФКД удобна в форме конечных автоматов. Это имеет и соответствующее методологическое обоснование. Носителем системы управления является сеть нейронов, причем ее формальной моделью может быть нейронная сеть с обратными связями. Это – т.н. рекуррентная нейронная сеть (РНС). В свою очередь известно, что рекуррентная сеть эквивалентна конечному автомату (КА). Также важно, что РНС, как и КА, создают множество внутренних состояний сети, которые позволяют реализовывать динамическое поведение во времени.

**Обобщенные автоматы.** Для создания ФКД удобно использовать т.н. обобщенные автоматы, реализующие обобщенные поведенческие процедуры. Обобщенный КА – это параметризованный КА с предикатными условиями переходов. Параметры определяют направленность поведения. На Рис. 2.4 приведен пример обобщенного автомата, реализующего поисковую процедуру.

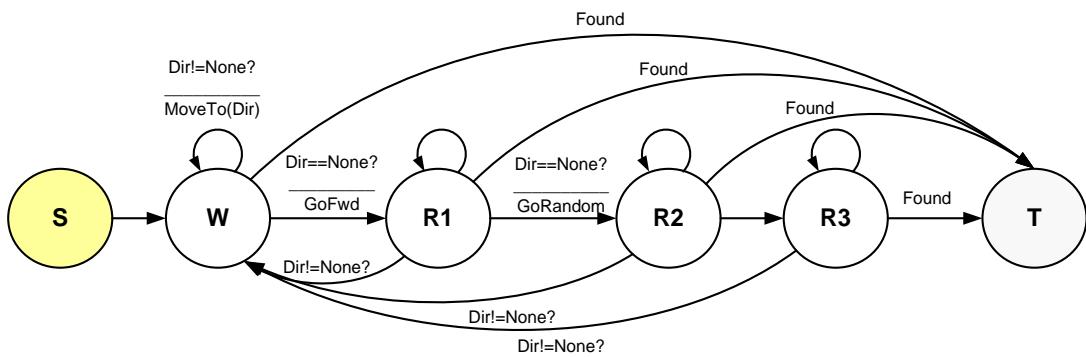


Рис. 2.4. Пример обобщенного поискового автомата

Здесь параметрами являются искомый объект (цель), а также двигательные (моторные) функции. С технической точки зрения обобщенный КА похож на некую подпрограмму, которой передаются те или иные параметры (в данном случае – целевой объект и моторная функция). Формально обобщенный КА является автоматом, входной алфавит которого ограничен символами 0 (False) и 1 (True). При этом условия переходов

определяются предикатами, вычисляемыми на каждом такте. Здесь следует отметить, что использование автоматов с предикатными условиями переходов связано с проблемами возможной неполноты и противоречивости по переходам. Эти вопросы освещались, например, в работах О.П.Кузнецова [Кузнецов, 2016а], однако в настоящем исследовании эти механизмы специально не рассматривались.

Многие формы поведения сводятся к реализации весьма ограниченного числа таких обобщенных процедур или автоматов. Помимо поисковых автоматов среди них можно выделить КА убегания от опасности и КА нападения (активного взаимодействия). Процедура свободного блуждания, например, сводится к обобщенному КА, у которого не определен параметр цели. Основной же интерес представляют ситуации, когда у робота имеются конфликты между его текущими потребностями и возможностями.

**Замечание.** В некотором смысле обратная эмоциональная связь, определяющая в конечном итоге рассогласование между желаемым и фактически исполняемым действием, может рассматриваться как аналог обратной афферентации в теории функциональных систем П.К. Анохина [Анохин, 1998].

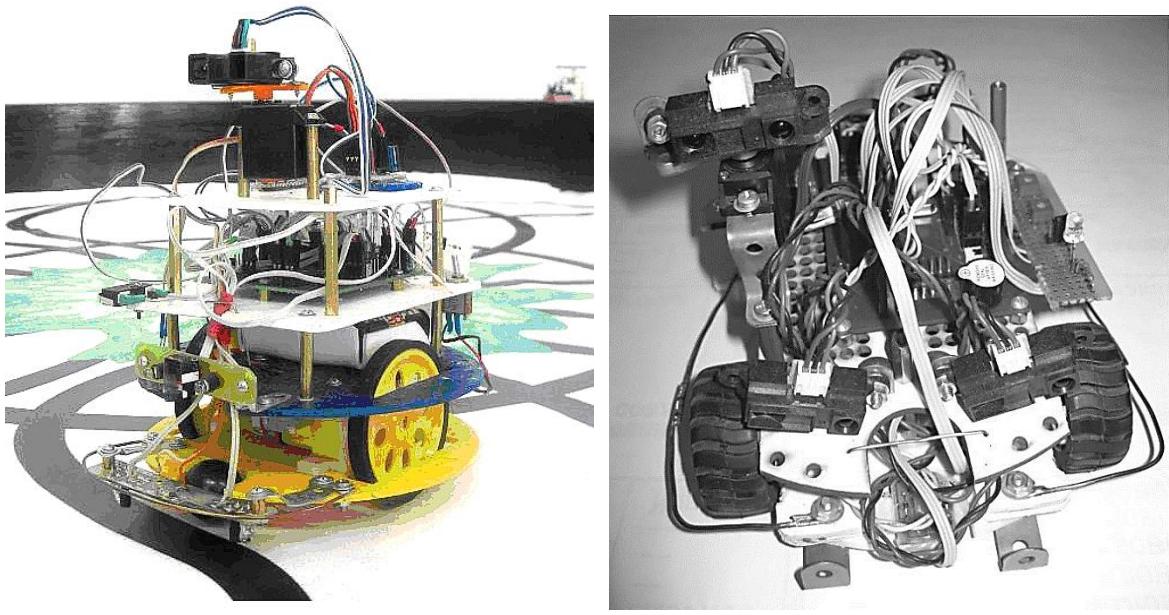
## Эксперименты

Для экспериментальной проверки модели был проведен ряд вычислительных и натурных экспериментов. Для натурных экспериментов были использованы мобильные минироботы. Эти "эмоциональные" роботы (Рис. 2.5) были оснащены набором простых сенсоров и решали стандартные поведенческие задачи, используя некоторые простые правила вида:

*"ЕСЛИ (голодный), ТО (искать еду)"*,

*"ЕСЛИ (обнаружено препятствие), ТО (уклониться)"*

и т.д.



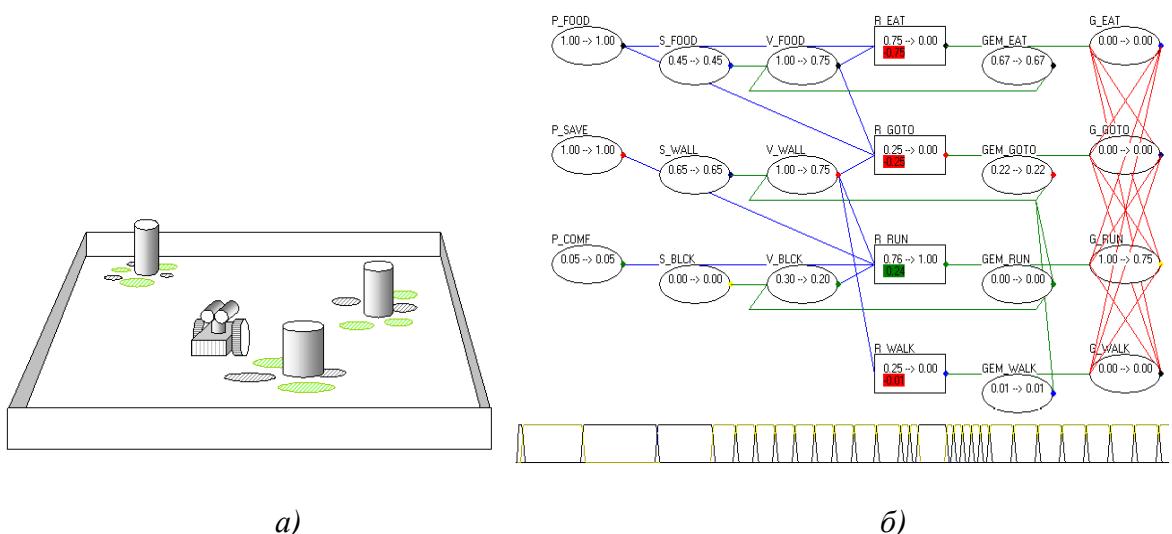
а)

б)

*Рис. 2.5. "Эмоциональные" роботы: а) вариант с удаленным управлением; б) универсальный робот, на котором отрабатывалась не только "эмоциональная", но и "темпераментная" составляющая системы управления*

Суть проведенных экспериментов заключалась в том, чтобы оценить влияние эмоционального компонента на характер поведения реального технического устройства. Входными данными для СУ робота были реальные сигналы от датчиков робота.

Среда обитания робота (полигон) – это ограниченная стенками область, в которой расположено некоторое количество предметов-препятствий. Вокруг этих препятствий на поверхности полигона имеются зеленые («корм») и темные («опасность») пятна, Рис. 2.6а.



*Рис. 2.6. а) среда обитания робота (условно), б) рабочая конфигурация системы и графики активностей выходных нейронов*

На Рис. 2.6,б изображена управляющая сеть эмоционально-потребностной СУ робота, взятая из программного интерфейса. Собственно, основным способом определения характера поведения робота являлось не непосредственное наблюдение за ним, а анализ графиков выходной активности.

С течением времени робот начинает испытывать «чувство голода». «Голод» утоляется, когда робот находится на зеленом пятне. При этом робот должен избегать темных участков. Для него это - неблагоприятный фактор. Кроме того, неблагоприятным (опасным) фактором считается приближение робота к препятствиям. Чем ближе робот находится к препятствию, тем сильнее чувство опасности (дискомфорт). Задача заключается в том, чтобы робот вел себя как можно более целесообразно, минимизируя свой дискомфорт. Целесообразное поведение выглядит так: если робот «сыт», то он избегает препятствий, если голоден, то он идет искать пищу, невзирая на стремление находиться на открытом месте.

Робот оснащен дальномером для определения расстояния до препятствия и датчиком цвета поверхности, различающим белый (светлый), черный и зеленый цвета. Это – его сенсорика. Действия, совершаемые роботом, являются, с точки зрения системы управления, высокоуровневыми, т.е. сложными поведенческими актами: «убегать от препятствия», «идти к препятствию», «избегать темных участков», «питаться». Эти действия реализуются т.н. «моторными программами» с помощью бортового контроллера.

Серия проведенных экспериментов показала следующее:

1. Эмоции являются естественным индикатором состояния робота. Более того, в некотором смысле, эмоции могут определить критерии обучения робота (основная цель заключается в уменьшении негативных эмоций).
2. Эмоции оттеняют (контрастируют) сенсорное восприятие и стабилизируют поведение робота.
3. Роль эмоций в условиях неполноты информации является основной.

Более детально эти эксперименты описаны в [Карпов, 2010]. Например, на Рис. 2.7 показано, как прекращаются и вновь возникают колебания в зависимости от величины эмоциональной связи КЭ.

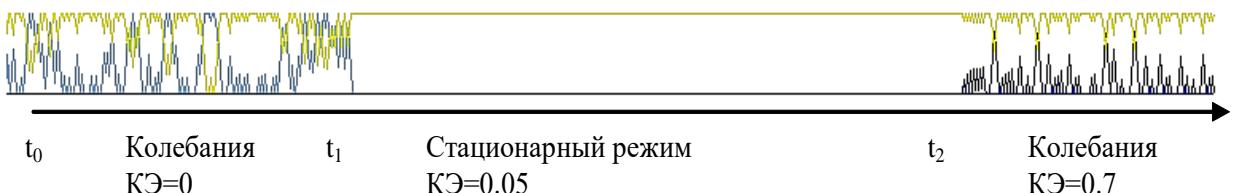
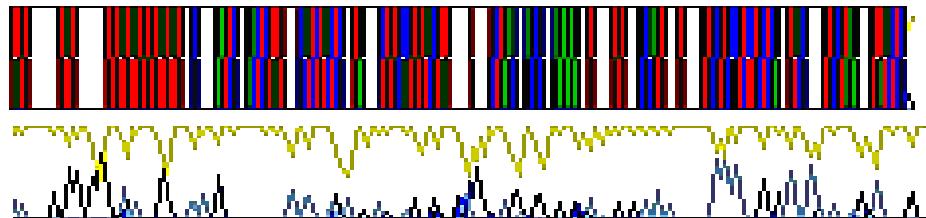


Рис. 2.7. Зависимость колебательного процесса от силы эмоций (КЭ)

Рис. 2.8. иллюстрирует роль выходных нейронов как фильтров. Если ограничиться лишь выходными сигналами от решающих правил, то мы получим высокочастотные колебания, такие, как изображены на верхнем графике.



*Рис. 2.8. Выходные сигналы. Вверху – выходы решающих правил, внизу – соответствующие им выходы служебных нейронов*

В этом смысле служебные нейроны выходной группы играют роль своеобразного фильтра низких частот, см. нижний график на Рис. 2.8. Введение же обратных тормозящих связей нейронов этой группы приводит к уменьшению времени релаксации системы.

Итак, поведение роботов определялось их текущей оценкой баланса между потребностями, актуальной необходимостью и способностью их удовлетворить. С технической стороны, эмоции определяют положительный отклик в системе управления робота. Подчеркнем еще раз, что эта эмоционально-потребностная модель использует обобщенные отрицательные и положительные эмоции, а основной акцент сделан на воздействие негативных эмоций.

**Примечание.** Негативные эмоции конструктивны, именно они определяют выбор поведения. Более того, именно отрицательные эмоции являются инициаторами активности агента, направленной на удовлетворение актуальной потребности. Положительная же эмоциональная оценка ситуации означает, что актуальных неудовлетворенных потребностей в настоящий момент времени нет, т.е. нет мотивации к активности.

### 2.2.3. Темперамент

Следующий шаг – переход от эмоций к описанию характера поведения агента. Одной из возможных систем для оценки психологических особенностей поведения животных является т.н. темперамент. Темперамент принадлежит к более высокому уровню управления, чем эмоции.

Согласно исследованиям И. Павлова [Павлов, 1927], [Павлов, 2010], различаются четыре гиппократовских темперамента: меланхолический, холерический, сангвенический

и флегматический. В своих работах Павлов опирался на баланс между возбуждением и торможением и определил четыре основных типа нервной системы следующим образом.

**Меланхолик.** Слабый тип, характеризующийся слабыми процессами возбуждения и торможения.

**Холерик.** Сильный, несбалансированный тип нервной системы, который характеризуется сильными процессами, но без должных пропорций: оба процесса сильны, но возбуждение доминирует над запаздывающим торможением.

**Сангвиник.** Сильный, сбалансированный (процессы возбуждения хорошо сбалансированы с процессами торможения), подвижный тип.

**Флегматик.** Сильный, сбалансированный тип, но с инертной нервной управляющей системой.

Павловская модель – это не единственная типология. Например, в [Ruch, 1992], описана типология темперамента по Эйзенку, как результат комбинации т.н. экстраверсии и невротизма. При этом очень важно, что возможно описать павловские типы в эйзенковских терминах. Другой подход изложен в [Barteneva, Lau, Reis, 2008], где для описания управляющей системы мобильного агента использована модель темперамента PAD. Эти три составляющие (или измерения) модели PAD (Pleasure, Arousal and Dominance – Удовольствие, Возбуждение, Доминирование) описывают любое эмоциональное состояние индивида. Но проблема состоит в том, что естественный способ перевода этих составляющих в параметры системы управления неочевиден. Например, в [Barteneva, Lau, Reis, 2008] "Удовольствие" определяется как достижение цели ("если агент видит маяк, и у него на пути нет препятствий, то в текущий момент его удовольствие максимально"), "Возбуждение" определяется количеством внимания, которое требует каждое событие ("чтобы избежать угроз, необходимо внимание агента") и т.д. К сожалению, такая ситуация, когда авторы пытаются использовать неестественные и даже искусственные рассуждения, достаточно широко распространена в исследованиях, посвященных реализации процессов высшей нервной деятельности в реальных роботизированных устройствах.

В данном исследовании было выдвинуто предположение, что поведенческие реакции описаны двумя факторами: силой и балансом нервных процессов возбуждения и торможения. В терминах возбуждения и торможения можно представить эти типы так, как показано ниже, Табл. 2.1.

Табл. 2.1. Типология темперамента в терминах возбуждения и торможения

Характер	Уровень возбуждения	Уровень торможение
Меланхолик	Низкий	Низкий
Холерик	Высокий	Низкий
Сангвиник	Высокий	Высокий
Флегматик	Низкий	Высокий

В таком случае мы можем охарактеризовать поведение робота следующим образом:

1. "**Меланхолик**": большая временная задержка ответа, ответ поддерживается в течение долгого времени.
2. "**Холерик**": короткая временная задержка ответа, но ответ поддерживается в течение относительно долгого времени.
3. "**Сангвиник**": быстрые, импульсивные и относительно непродолжительные реакции.
4. "**Флегматик**": длительная временная задержка и непродолжительный ответ.

Сами термины "возбуждение" и "торможение" можно рассматривать с различных сторон. Например, существует т.н. "Теория возбуждения" [Keltner, Gruenfeld, Anderson, 2003], [Schrobsdorff и др., 2012], которая описывает субъективное выполнение умственной задачи. Эта теория базируется на том предположении, что субъект действительно проходит серию альтернативных состояний от отвлеченного (нерабочего) состояния к состоянию внимания (рабочему). В этой теории возбуждение определяет скорость этих переходов. Кроме того, мы можем отметить такой интересный и важный аспект возбуждения, как защитный механизм мозга – ответ организма на подавляющие стимулы ("запредельное торможение" в павловской терминологии [Enpsychopedia, 2008], [Павлов, 1927]).

С другой стороны, баланс торможения и возбуждения может рассматриваться в контексте нейрофизиологии, в терминах мембранных потенциала нейронов. В этой ситуации торможение и возбуждение описываются коэффициентами вариации межспайковых интервалов [Okun, Lampl, 2009].

В данной работе торможение и возбуждение используются как параметры (значение и направление) обратной связи в системе управления робота. Этот подход близок к подходу брайтенбергских "тормозящих элементов" [Braitenberg, 1984], которые противодействуют сигналам возбуждения, приходящими на пороговые элементы устройств с других (внешних) источников.

Конечно, эти модели эмоций и темперамента, которые сведены до терминологии механизма обратной связи, являются очень приблизительными и даже примитивными. Это так, и необходимо доопределять их, усложнять, наполнять большим содержанием. Но эти модели работают на практике, они работают в реальных робототехнических системах. В инженерном деле часто случается так, что некоторые "грубые" теории оказываются более приемлемыми на практике, чем "точные" и строгие теории. Это происходит, когда не существует интегральной и адекватной теории, охватывающей полностью тот или иной феномен. К примеру, на первом этапе становления теории автоматического регулирования иногда оказывалось, что тщательная проработка, шлифовка узлов и механизмов приводила к тому, что такие регуляторы, в отличие от своих "грубых" предшественников, переставали работать. Другим примером является нечеткая логика. На практике использование простых функций принадлежности иногда более приемлемо, чем применение высокоточных функций или концепции степеней функций принадлежности.

#### **2.2.4. Система управления**

Для более предметного обсуждения вопроса применимости предложенного подхода рассмотрим следующую задачу. Пусть существует простой робот, который "любит" темные места и "боится" ярко освещенных мест, имеет потребность в "пище" и старается избегать столкновений с препятствиями. Этот робот 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.

В дополнение к этому робот имеет набор потребностей: потребность в пище, в безопасности (он "боится" столкновений), потребность в комфорте (он любит темные места и не любит свет). Когда робот находится в темноте и не голоден, он "спит".

Предполагается, что основная система управления робота оперирует только терминами поведенческих процедур. Эта система управления не использует таких действий, как "поворнуть налево или направо", "двигаться вперед или назад" и т.п. Все эти действия перенесены на нижний уровень управления. Основная система управления применяет сложные поведенческие процедуры: поиск пищи, сон (отдых) и т.д., см. Рис. 2.9.

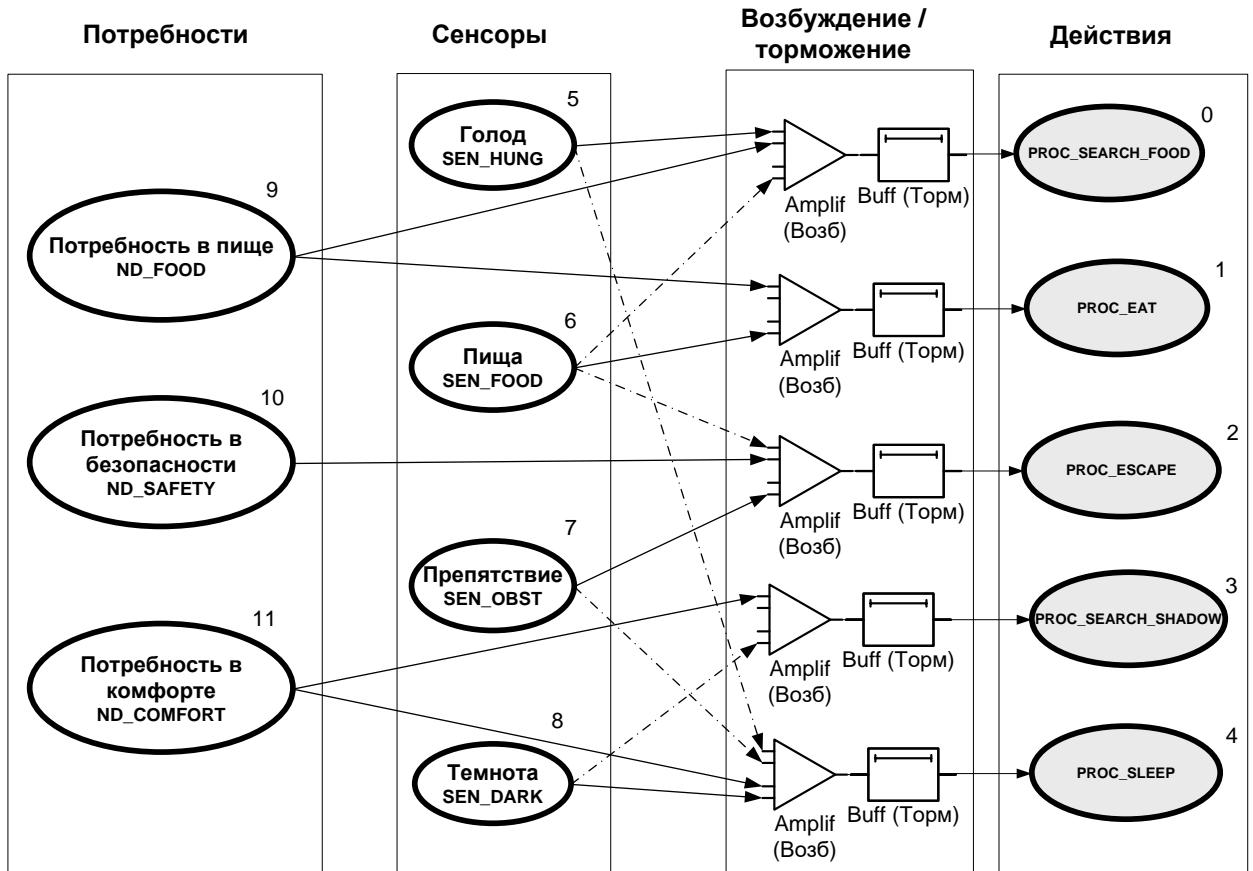


Рис. 2.9. Архитектура системы управления с "темпераментным" компонентом

Итак, предположим, что наш робот имеет потребность в пище (блок "Потребности" выдает постоянный сигнал) и он эту пищу нашел (блок "Сенсоры"). Соответствующее правило поведения будет таким:

$$\text{ЕСЛИ}(s_{food}^{need} \& s_{food}^{sens}), \text{ТО } C_{eat}^{proc}[f(PROC_EAT)]$$

Здесь  $s_{food}^{need}$ ,  $s_{food}^{sens}$  – величины сигналов от блока потребностей в пище и сенсора обнаружения пищи соответственно, а  $C_{eat}^{proc}[f(PROC_EAT)]$  – заключение правила, которое должно вызвать запуск процедуры поедания найденной пищи.

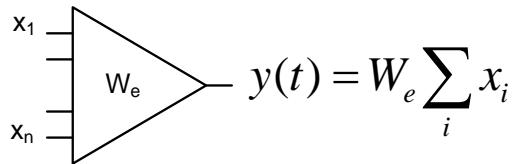
Вывод  $C_{eat}^{proc}$  не приводит к немедленному запуску процедуры PROC\_EAT.

$$C_{eat}^{proc} \rightarrow ? \rightarrow exec(PROC_{eat})$$

Сигнал  $C_{eat}^{proc}$  проходит через блок "Возбуждение/торможение" для активации соответствующих процессов.

Основная проблема заключается в реализации механизмов возбуждения и торможения в этой системе. Параметр возбуждения реализован более естественным образом: используется некий аналог искусственного нейрона. Этот элемент принимает входные сигналы (от датчиков и блока "Потребности"), суммирует их и передает на

выход. В отличие от стандартного нейрона, здесь не используются весовые коэффициенты (взвешенные входы), а определяется лишь общий вес для всех входов. Значение этого веса и есть параметр возбуждения.



Параметр торможения является более проблематичным и менее естественным. В качестве вариантов его реализации рассматривалось применение обратной связи для взаимного торможения выходных сигналов (т.н. *латеральное торможение*), а также использование прямого торможения сенсорной активности. Однако оба варианта приводили к нечетко выраженной реакции, несколько невнятным (с точки зрения внешнего наблюдения) результатам. В итоге оказалось, что наиболее приемлемым решением является использование выходного буфера памяти.

Предположим, что все выходные сигналы проходят через линии задержки. Эти задержки могут представлять собой процесс торможения или, точнее, определять инерционность системы. Следующим шагом является применение вместо простой линии задержки более подходящего для использования буфера, который формирует среднее арифметическое входных сигналов. Длина этого буфера и была принята в качестве значения параметра торможения.

**Примечание.** Отметим, что исследование параметров моделей торможения на основе применения фильтров низкой частоты, экспоненциальной релаксации или использовании сигмоидальных функций и т.п. требуют отдельного изучения. Скорее всего, здесь мы столкнемся с типичной оптимизационной многопараметрической задачей. Использование же буфера типа "скользящее среднее" – это более грубое, прямолинейное, но вполне работающее решение.

Выходные элементы взаимно тормозят друг друга, одновременно активируя сами себя (эти связи не показаны на Рис. 2.9). Таким образом, через некоторое время будет активирован только один выходной элемент. Этот элемент напрямую определяет процедуру поведения, которая и будет выполняться. В некотором смысле мы имеем систему вида "победитель получает всё".

**О характере сигналов.** В приведенной схеме все сигналы принимают значение в диапазоне [0,1]. С точки зрения классической инженерии знаний это не самая удобная

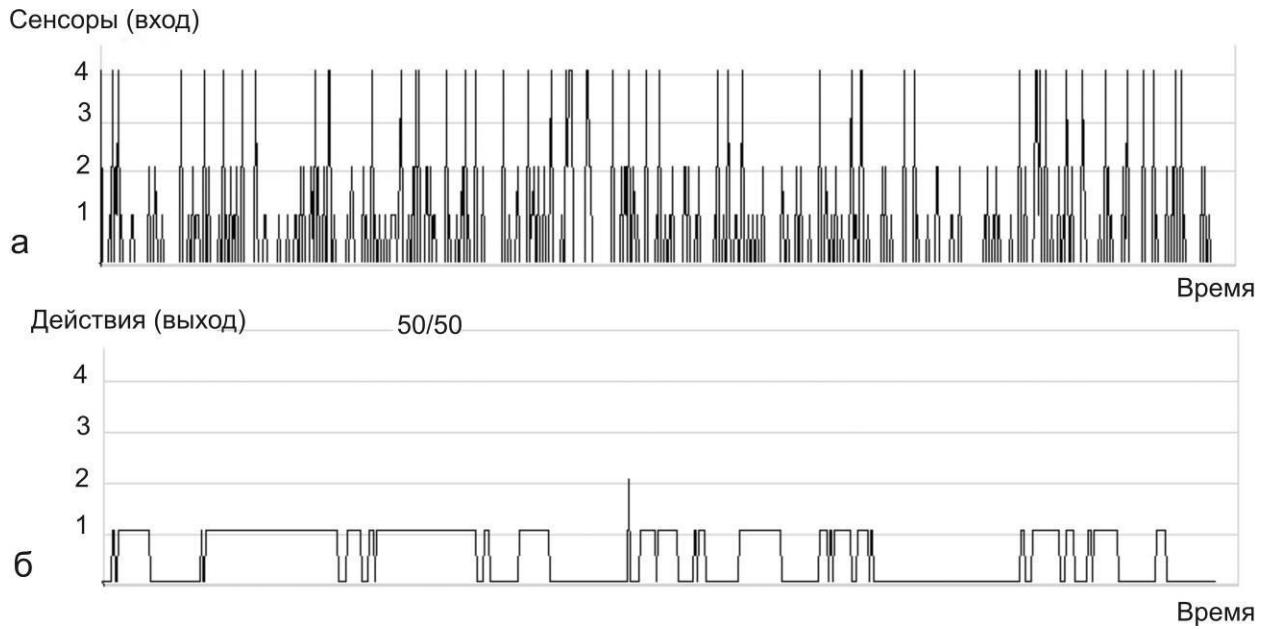
шкала. На практике предпочтительнее биполярные шкалы оценок от +1 (максимальная уверенность в наличии свойства) до -1 (уверенность в обратном). Точка 0 играет роль полной неопределенности. Действительно, может показаться, что, например, понятия "свой"/"чужой" могут быть представлены единым источником с диапазоном значений [-1, 1]: +1 – абсолютно свой, -1 – абсолютно чужой. Однако биполярная схема неудобна с точки зрения управления поведением. Например, наблюдаемый объект по некоторым признакам может быть отнесен к категории "свой", а по другим – к категории "чужой". Исходя из такого "противоречия" формируется дуализм поведения. Мы к своему можем относиться как к чужому в зависимости от контекста. Например, решая задачу определения лидерства (доминирования), объект, на который направлена активность (соперник), является по определению "своим". С другой стороны, соперник является препятствием на пути удовлетворения потребности в доминировании. И на этого своего направлена деятельность деструктивного характера, которая может быть оценена как агрессия. Т.е. в контексте задачи доминирования объект воспринимается как чужой, со всеми вытекающими последствиями.

### **2.2.5. Эксперименты**

Проверка предложенных моделей включала в себя проведение серий вычислительных экспериментов и натурных испытаний.

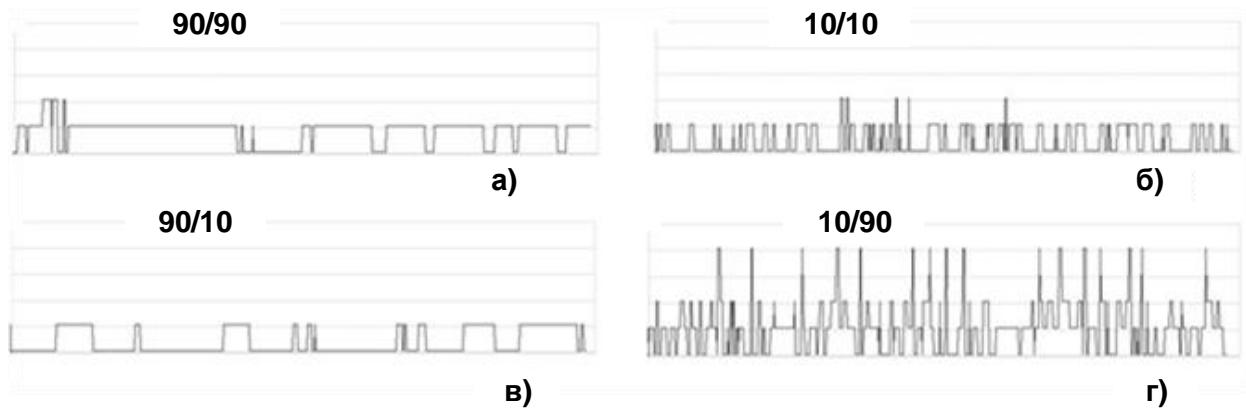
#### **Вычислительные эксперименты**

Входные сигналы имитировались псевдослучайной последовательностью (Рис. 2.10,а). В каждый момент генерировался случайный сигнал датчика (значения от 1 до 4: "пища", "темнота", "препятствие" и "опасность"). Затем определялась одна из выходных реакций – номер сработавшей процедуры поведения, Рис. 2.10,б.



*Рис. 2.10. Результаты вычислительных экспериментов: а) случайная входная последовательность, б) выходные сигналы (номер поведенческой процедуры)*

Баланс между торможением и возбуждением определяет явным образом манеру поведения робота, Рис. 2.11.



*Рис. 2.11. Зависимость выходной реакции от баланса между торможением и возбуждением в системе управления: а – сангвиник, б – меланхолик, в – флегматик, г – холерик*

Далее будем считать, что сила возбуждения и торможения представлена как некая величина в диапазоне от 0 до 100 (процент от некоторого максимального значения параметра). Если мы имеем высокий уровень возбуждения и торможения (90/90, Рис. 2.11,а), то поведение робота достаточно стабильно (сангиник). Низкий уровень возбуждения и торможения (10/10, Рис. 2.11,б) с высокой вероятностью повлечет смену процедуры поведения робота, но в ограниченном диапазоне реакций (меланхолик).

Высокий уровень торможения и низкий уровень возбуждения (90/10, Рис. 2.11,в) приведет к тому, что робот будет менять свое поведение редко (флегматик). И, в конце концов, когда мы имеем низкий уровень торможения и высокий уровень возбуждения (10/90, Рис. 2.11,г), робот становится холериком, с высокой вероятностью изменения поведения и широким диапазоном реакций. Различия в поведении робота очевидны.

Эти иллюстрации имеют только качественный характер. Они описывают влияние баланса между торможением и возбуждением на манеру поведения робота – стабильность реакции, скорость, способность игнорировать внешние часто повторяющиеся сигналы и т.д. Главная и наиболее интересная задача заключалась в проведении экспериментов на реальном техническом устройстве.

### "Натурные" эксперименты

Мобильный робот TR-12, на котором проводились эксперименты, оборудован множеством сенсоров – бамперами, инфракрасными датчиками расстояния, датчиками света и т.д. Робот также оснащен средствами коммуникации, которые позволяют ему создавать канал связи с удаленным компьютером. На самом деле это простая универсальная платформа, которая может функционировать как автономно, так и в режиме управления. В отличие от роботов на Рис. 2.5, эта платформа имеет полнофункциональную бортовую систему управления. Возможностей этой системы управления достаточно, чтобы реализовать все эмоциональные и темпераментные модели поведения.

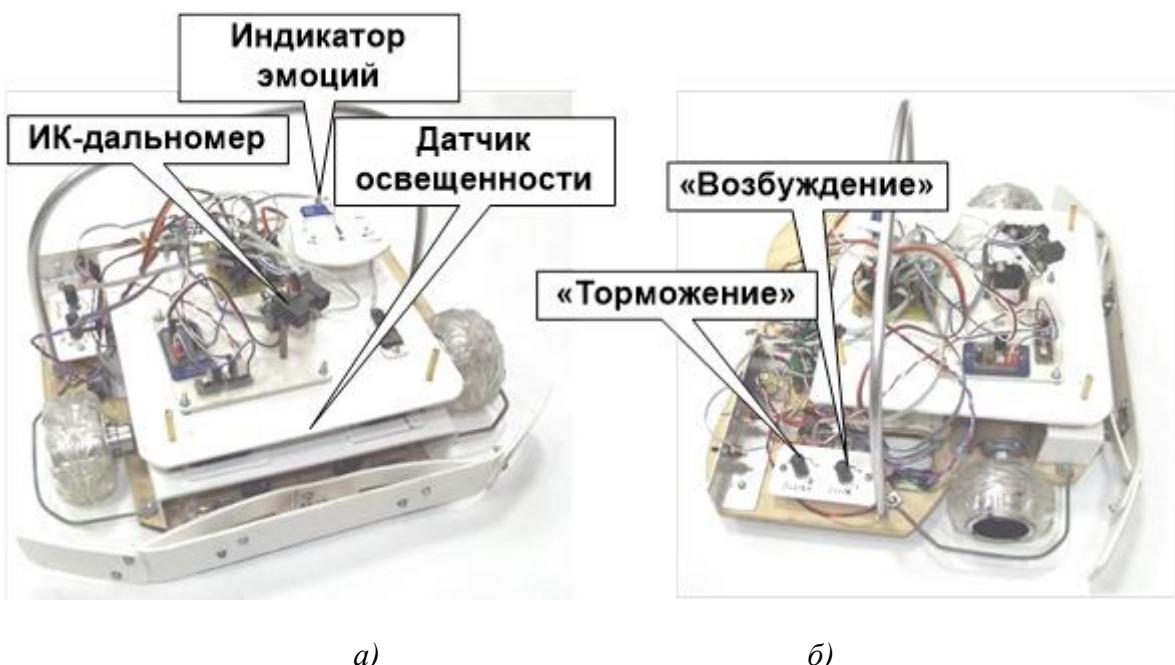


Рис. 2.12. Мобильный робот TR-12

Наиболее интересными компонентами этого робота являются "Индикатор эмоций" и "Регулятор темперамента". "Индикатор эмоций" является аналогом индикатора, который использовался для демонстрации эмоционального состояния робота (в соответствующих экспериментах). Это была аналоговая стрелка, амплитуда и направление отклонения которой определяли знак и величину испытываемой роботом текущей суммарной эмоции.

"Регулятор темперамента" состоит из двух частей: регулятора "Возбуждение" и регулятора "Торможение". Значения параметров возбуждения и торможения определяются позициями этих регуляторов. Например, когда регулятор "Торможение" установлен в максимальную позицию, а регулятор "Торможение" – в минимальную, робот становится флегматиком.

Как было указано, основой системы управления робота был набор продукции. Окончательная реализация набора правил поведения состояла из семи процедур:

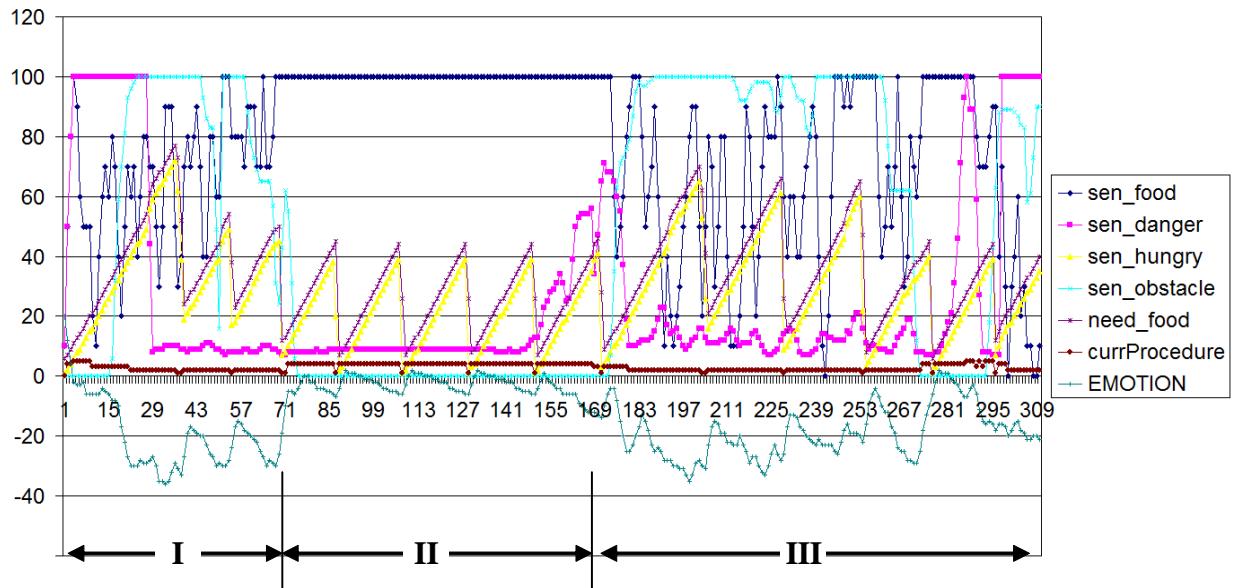
1. ЕСЛИ требуется\_пища И найдена\_пища, ТО Процедура\_есть\_пищу
2. ЕСЛИ выявлено\_препятствие И требуется\_пища И НЕ(найдена\_пища),  
ТО Процедура\_двигаться\_к\_препятствию
3. ЕСЛИ НЕ(выявлено\_препятствие) И требуется\_комфорт, ТО Процедура\_гулять
4. ЕСЛИ требуется\_безопасность И выявлено\_препятствие, ТО  
Процедура\_бежать\_прочь
5. ЕСЛИ требуется\_комфорт И выявлена\_опасность, ТО Процедура\_найти\_тень
6. ЕСЛИ требуется\_комфорт И НЕ(выявлена\_опасность), ТО Процедура\_спать
7. ЕСЛИ требуется\_пища И НЕ(найдена\_пища), ТО Процедура\_искать\_пищу

Каждый вывод в этих правилах представляет собой определенную процедуру поведения. Все эти процедуры базируются на конечных автоматах. Данный набор правил предусматривает достаточно широкий диапазон поведенческих действий.

**Примечание.** В отличие от систем продукции, применяемых, например, в интеллектуальном планировании, в этих продукциях не требуется определять списки добавлений и вычеркваний. Робот сам изменяет состояние мира, совершая действия физически.

Сила (интенсивность) и баланс между торможением и возбуждением были заданы положениями соответствующих регуляторов, Рис. 2.12,б. Главная проблема заключалась в том, как определить поведение робота. Для этого был применен индикатор, аналогичный эмоциональному индикатору (Рис. 2.12,а), который показывал номер текущей процедуры поведения. Окончательно система управления робота объединила обе предыдущих схемы: эмоциональную (Рис. 2.3) и темпераментную (Рис. 2.9).

На практике основной проблемой была сложность, связанная с определением формальных критериев или оценок эмоционального или темпераментного поведения робота. На Рис. 2.13 приведен фрагмент множества значений сенсоров и реакций робота на них на временном интервале в 150 секунд.



*Рис. 2.13. Информация с сенсоров, реакция робота и его эмоциональное состояние*

Более того, мы можем только оценить эмоциональное состояние робота (нижний график) и дать общую, качественную интерпретацию поведения робота в определенный момент времени. Например, вначале робот получил сигнал опасности ("sen\_danger"), оставаясь при этом голодным ("sen\_hungry" or "need\_food").

Если робот не имеет возможности удовлетворить чувство голода, его основная эмоциональная оценка ситуации будет отрицательной. Это соответствует промежутку времени I. Далее, сигнал опасности пропал (интервал времени II) и робот смог выполнить процедуру "поедание пищи". В конце ситуация повторилась снова (интервал времени III) и робот опять начал испытывать отрицательные эмоции. Таким образом, проведенные эксперименты носили, в основном, качественный, а не количественный характер.

Основным методом для определения состояния и оценки поведения робота были длительные наблюдения. Иногда было ясно видно, что поведение робота становилось нервозным (как у холерика), иногда поведение было очевидно заторможенным, но были сложности в идентификации различий между поведением сангвиника и флегматика. Однако, это общая проблема психологии и физиологии: в действительности нет чистых типов темпераментов, но есть смесь из различных свойств (черт), которые характеризуют тот или иной тип темперамента.

Тем не менее, можно считать, что эти эксперименты подтвердили наши предположения. Будучи очень осторожными в вопросах психологической интерпретации поведения робота, попробуем ограничиться только описанием и интерпретацией некоторых наблюдаемых эффектов.

Например, в одной из серий экспериментов определялись средние значения эмоций как функций от параметров возбуждения и торможения. Некоторые типичные результаты показаны в Табл. 2.2:

Табл. 2.2. Экспериментально определенная зависимость между эмоциями робота и параметрами возбуждения/торможения

Значение возбуждения (1..10)	Значение торможения (1..10)	Эмоции (-100..+100)	Тип
10 (высокое)	1 (низкое)	-60	Холерик
5 (высокое)	10 (высокое)	-24	Сангвиник
1 (низкое)	10 (высокое)	+20	Флегматик

Робот-холерик в основном имел достаточно сильные и определенно негативные эмоции. Его поведение было очень раздраженным (неврастеничным). 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.

Таким образом, мы можем сделать вывод о том, 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. По крайней мере, робот пытается что-то делать. Это видно по тому, что происходит частое переключение между поведенческими программами.

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 [Barteneva, Lau, Reis, 2008]. С другой стороны, темперамент определяет параметры механизма эмоций. Темперамент, как постоянный, "психический" уровень, определяет эмоциональные параметры – коэффициенты возбуждения и торможения.

### 2.2.6. Автоматная модель темперамента

Наблюдения и/или имитационное моделирование – не самые удобные способы анализа поведения робота. Далее будет описана попытка создания механизма анализа поведения, причем не на внешнем, бихевиористском уровне, а хотя бы на уровне статистического анализа и простых вычислительных экспериментов.

В основе дальнейших рассуждений будет лежать предположение: модель темперамента как характеристики поведения может быть представлена в виде конечного автомата. Далее, если это не будет оговорено особо, мы будем опираться на результаты исследований М.Л. Цетлина и его школы в области поведения автоматов [Цетлин, 1969].

Сведя, как это было показано выше, определение темперамента к балансу между возбуждением и торможением, попробуем проинтерпретировать эти параметры в терминах структур обучающихся автоматов. Рассмотрим для примера конечный детерминированный автомат, называемый линейным.

**Линейный автомат (автомат с линейной тактикой)**  $L_{fn,f}$ . Автомат совершает  $f$  действий и имеет  $f \cdot n$  состояний. Ниже приведен граф частного случая такого автомата –  $L_{2n,2}$  (Рис. 2.14). Этот автомат совершает два действия и имеет  $2 \cdot n$  состояний. В состояниях  $q_i^1$  он совершает действие  $f_1$ , а в состояниях состояниях  $q_i^2$  – действие  $f_2$  ( $i=1,2,\dots,n$ ).

При получении сигнала поощрения ("0") автомат изменяет свое состояние, уходя все глубже от точки смены действия. При получении сигнала наказания ("1") автомат переходит в состояния с меньшим номером, приближаясь к точке смены действия.

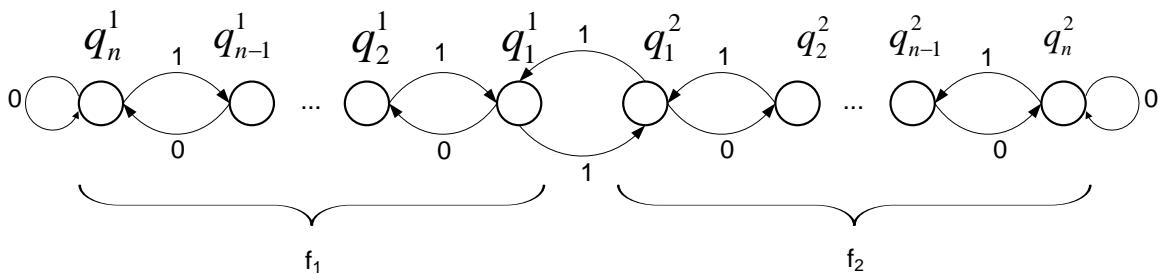


Рис. 2.14. Автомат с линейной тактикой

Автомат с линейной тактикой может быть погружен в стационарную случайную среду  $C=C(a_1, a_2, \dots, a_n)$ . Параметры среды  $a_i$  имеют следующий смысл: действие автомата

$f_i$  влечет выигрыш с вероятностью  $p_i = \frac{1+a_i}{2}$  и проигрыш с вероятностью  $q_i = \frac{1-a_i}{2}$ .

Фактически, параметры  $a_i$  представляют собой математическое ожидание выигрыша автомата.

Считается, что автомат обладает целесообразным поведением в среде  $C$ , если его математическое ожидание выигрыша больше, чем у автомата, который совершает свои действия равновероятно и независимо от реакций среды.

Исходя из вышеизложенного, можно ввести следующую интерпретацию возбуждения и торможения. Будем считать, что величина параметра "возбуждение" определяет тенденцию перехода автомата в *удаленное* состояние  $q_n^i$  некоторой выбранной ветви  $i$  при получении сигнала поощрения. "Торможение" будет определяться тенденцией автомата к сохранению выбранной тактики при наказании. Чем ниже величина торможения, тем более склонен автомат к смене действия, т.е. к переходам в состояния  $q_1^1$ .

В этом смысле линейный автомат может характеризоваться низким уровнем возбуждения и низким уровнем торможения. С точки зрения темперамента его поведение можно считать меланхоличным.

Рассмотрим еще несколько конструкций автоматов.

**Автомат  $D_{fn,f}$ .** Отличие этого автомата от  $L_{fn,f}$  заключается в том, что, получив сигнал поощрения (0), он сразу переходит в самое глубокое состояние, соответствующее этому действию. Это – т.н. "доверчивый" автомат" (Рис. 2.15).

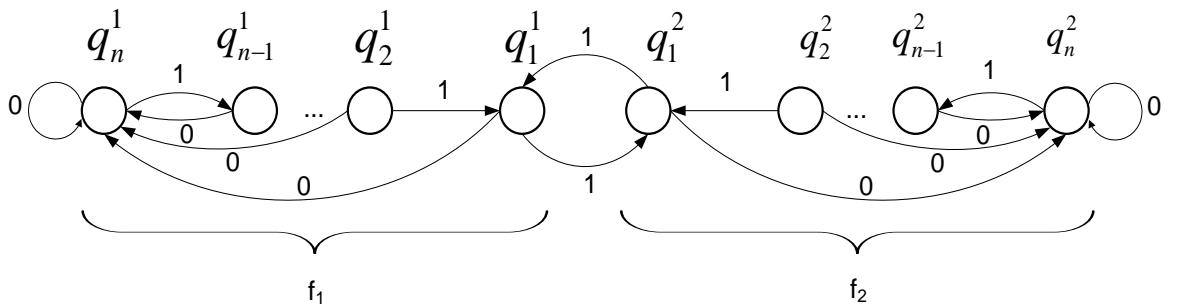


Рис. 2.15. "Доверчивый" автомат

**Автомат  $N_{fn,f}$ .** Этот автомат, напротив, пессимистичен (Рис. 2.16). Получая сигнал поощрения, он последовательно переходит в более глубокое состояние, а вот получив сигнал наказания (1), сразу меняет свою тактику: из состояния  $q_i^a$  (действие  $f_a$ ) переходит в состояние  $q_1^{a+1}$  (действие  $f_{a+1}$ ).

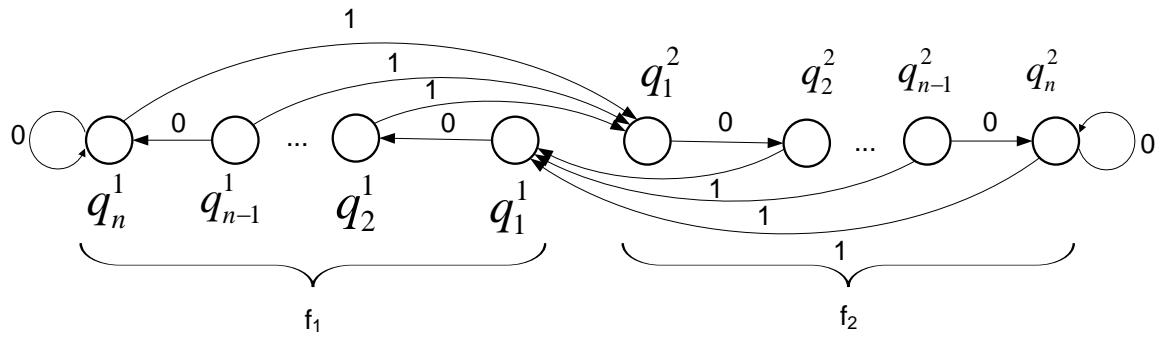


Рис. 2.16. "Недоверчивый" автомат

**Автомат  $P_{fn,f}$ .** Это – некоторая модификация автомата  $N_{fn,f}$ . Однако его реакция на наказание менее пессимистична. При наказании он не меняет сразу свою тактику, однако переходит в состояние, близкое к точке смены действия: из состояния  $q_i^a$  переходит в состояние  $q_i^a$ . Если, находясь в этом состоянии, он получает сигнал наказания, то тогда происходит смена тактики (Рис. 2.17).

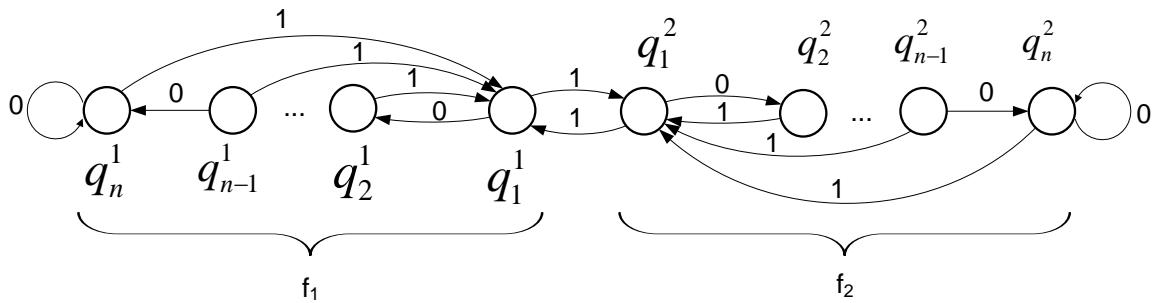


Рис. 2.17. "Пессимистический" автомат

**Автомат  $L_{ff}$ .** Частный случай автомата с линейной тактикой  $L_{fn,f}$ , у которого количество действий равно количеству состояний. Глубина памяти такого автомата минимальна и он немедленно реагирует на сигнал наказания, меняя свое действие, см. Рис. 2.18. В каком-то смысле поведение такого автомата можно считать "неврастеничным".

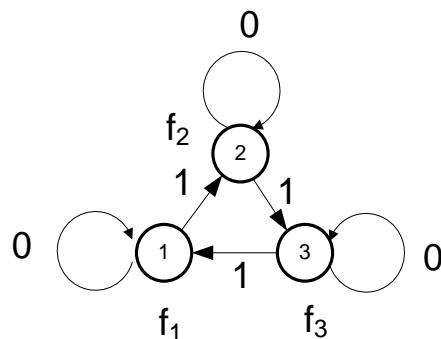


Рис. 2.18. "Неврастеничный" автомат

Крайне важным является то обстоятельство, что конструкции некоторых автоматов образуют т.н. асимптотически оптимальные последовательности. Таковыми являются автоматы  $L_{fn,f}$  и  $D_{fn,f}$ . Это означает, что при бесконечном росте числа состояний  $n$  математическое ожидание выигрыша стремится к своему теоретическому максимуму, т.е. автомат всегда совершает наиболее выгодное действие, даже если разница между параметрами среды  $a_i$  сколь угодно мала. К сожалению, вопрос, образуют ли автоматы  $N_{fn,f}$  и  $P_{fn,f}$  такие же асимптотически оптимальные последовательности, остается открытым.

Итак, если принять нашу интерпретацию параметров возбуждения и торможения, то мы получим следующую картину (Табл. 2.3):

Табл. 2.3. Соответствие конструкции автомата и темперамента

Уровень возбуждения	Уровень торможения	Темперамент	Автомат
Низкий	Низкий	Меланхолик	Автомат с линейной тактикой $L_{fn,f}$
Высокий	Низкий	Холерик	"Неврастеничный" автомат $L_{f,f}$
Высокий	Высокий	Сангвиник	"Доверчивый" автомат $D_{fn,f}$
Низкий	Высокий	Флегматик	"Недоверчивый" автомат $N_{fn,f}$ или "Пессимистический" автомат $P_{fn,f}$

Разумеется, здесь и далее речь идет о ситуациях, когда нам заранее не известны свойства среды, иначе все рассуждения теряют смысл.

Сама по себе задача поведения автомата в стационарных случайных средах изучена достаточно полно, и вряд ли требует привлечения таких феноменов, как эмоции и темперамент. Интерес представляет поведение автоматов в сложных, составных средах.

Составная среда  $K$  состоит из стационарных случайных сред и описывается цепью Маркова  $K(C^{(1)}, \dots, C^{(V)}, \Delta)$ . Каждое состояние  $C^{(i)}$  соответствует стационарной случайной среде  $C^{(i)} = C(a_1^i, a_2^i, \dots, a_n^i)$ , а  $\Delta$  – матрица переходных вероятностей.

Эффективность поведения автомата в некоторой составной среде зависит от структуры и глубины его – автомата – памяти. И наоборот: для каждой составной среды различные по своей структуре автоматы показывают разную эффективность.

Далее приводятся результаты вычислительных экспериментов, в которых автоматы погружались в составные среды с различными характеристиками. Каждая составная среда  $K$  характеризовалась следующими параметрами:

**1. Свойства входящих в ее состав стационарных случайных сред.** Каждая стационарная среда  $C^{(i)}$  имела одинаковую структуру

$$C^{(i)} = C(-a, \dots, a, \dots, -a), \quad a_j^i = \begin{cases} a, & i = j \\ -a, & i \neq j \end{cases}$$

и характеризовалась одним параметром  $a$ . Этот параметр (матожидание выигрыша) определял своего рода степень "предрасположенности" среды к тому или иному действию.

**2. Свойства матрицы переходных вероятностей  $\Delta$ .** Матрицы различались по структуре (характеру составной среды или типу) и по значению вероятностей переключений  $\delta$ . По структуре были выделены два типа:

а) Тип "стационарный". Эта "почти стационарная" среда описывалась следующей матрицей:

$$\Delta_{ij} = \begin{cases} \delta, & j = 0 \\ \frac{1-\delta}{n-1}, & j \neq 0 \end{cases}$$

Смысл ее состоит в том, что в основном работает первая стационарная среда (значения вероятностей в первом столбце больше остальных). Например, матрица переходных вероятностей для трех стационарных сред выглядит так:

$$\Delta = \begin{bmatrix} \delta & \frac{1-\delta}{2} & \frac{1-\delta}{2} \\ \delta & \frac{1-\delta}{2} & \frac{1-\delta}{2} \\ \delta & \frac{1-\delta}{2} & \frac{1-\delta}{2} \end{bmatrix}$$

б) Тип "переключатель". С большей вероятностью система сохраняет свое текущее состояние, нежели реализует переключение на другие стационарные среды:

$$\Delta_{ij} = \begin{cases} \delta, & i = j \\ \frac{1-\delta}{n-1}, & i \neq j \end{cases}$$

Пример матрицы для трех стационарных сред:

$$\Delta = \begin{bmatrix} \delta & \frac{1-\delta}{2} & \frac{1-\delta}{2} \\ \frac{1-\delta}{2} & \delta & \frac{1-\delta}{2} \\ \frac{1-\delta}{2} & \frac{1-\delta}{2} & \delta \end{bmatrix}$$

Теперь перейдем к результатам собственно экспериментов. Во всех экспериментах, описанных ниже, время моделирования составляло 5000 тактов.

**1. Эксперимент LD.** Почти стационарная среда. Характеристики составной среды:  $a=0.2$ ,  $\delta=0.99$ , тип матрицы – "стационарный". Эксперимент проводился для четырех типов автоматов:  $L$  – автомат с линейной тактикой,  $D$  – "доверчивый" автомат,  $N$  – "недоверчивый",  $P$  – "пессимистический" автомат. На Рис. 2.19 по оси абсцисс отложено время, а по оси ординат – значение показателя качества автомата  $\eta(t)$ , соотношение между числом поощрений  $N_0(t)$  и наказаний  $N_1(t)$ , полученных к моменту времени  $t$ .

$$\eta(t) = \frac{N_0(t)}{N_0(t) + N_1(t)} \quad (2.16)$$

Величина  $\eta(t)$  у автоматов типа  $L$  и  $D$  стремится к теоретическому максимуму – значению матожидания выигрыша. В такой среде преимущества у автоматов  $L$  и  $D$  очевидны, причем лучшие результаты показывает автомат с линейной тактикой  $L$  (Рис. 2.19). Это можно трактовать так, что стационарная среда является наиболее предпочтительной для меланхолика.

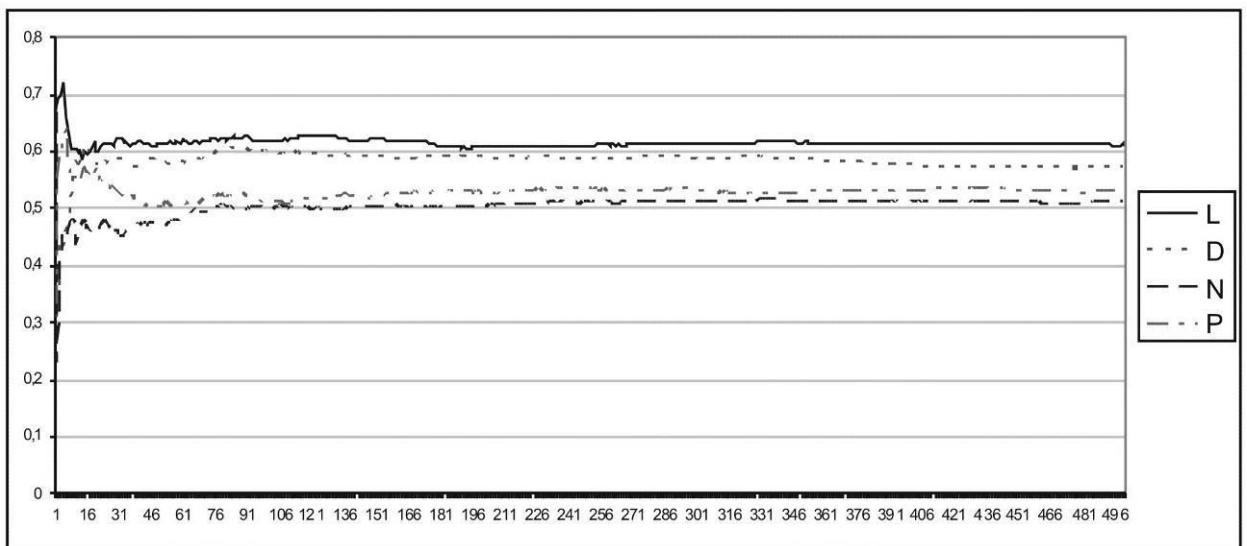
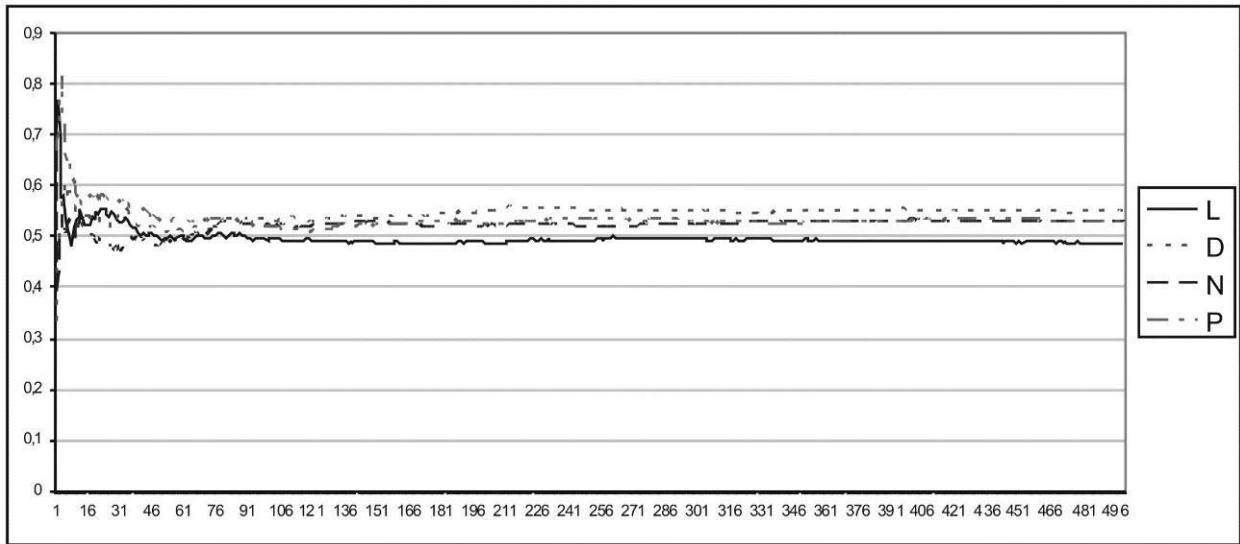


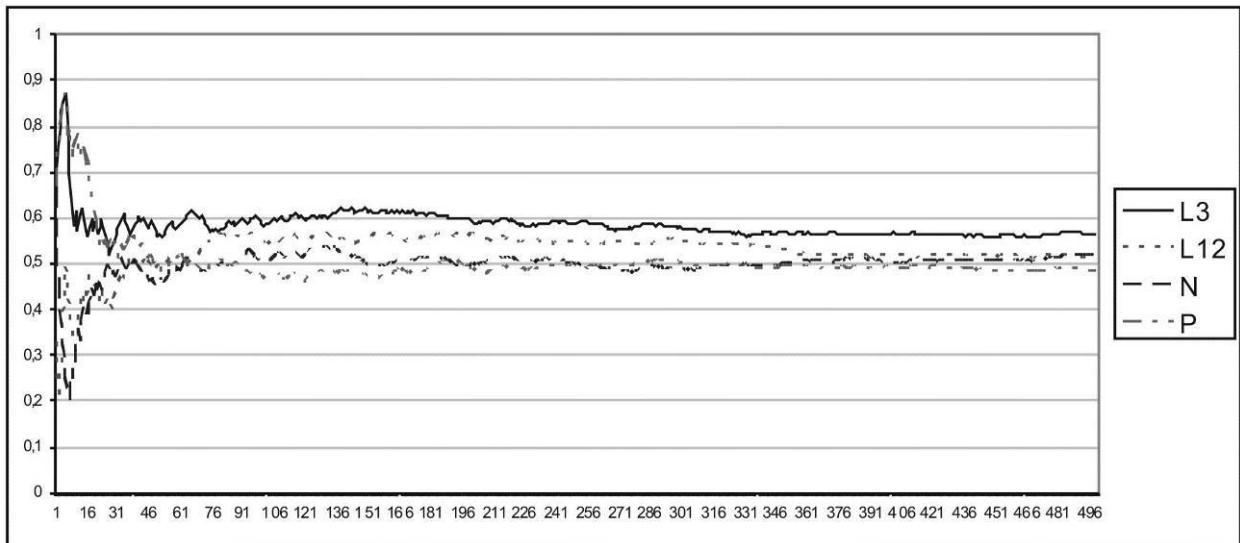
Рис. 2.19. "Почти стационарная" среда. Преимущество у автомата с линейной тактикой – меланхолика

**2. Эксперимент D.** Характеристики составной среды:  $a=0.5$ ,  $\delta=0.9$ , тип матрицы – "переключатель". Здесь преимущество получает доверчивый автомат  $D$ , т.е. сангвиник (Рис. 2.20).



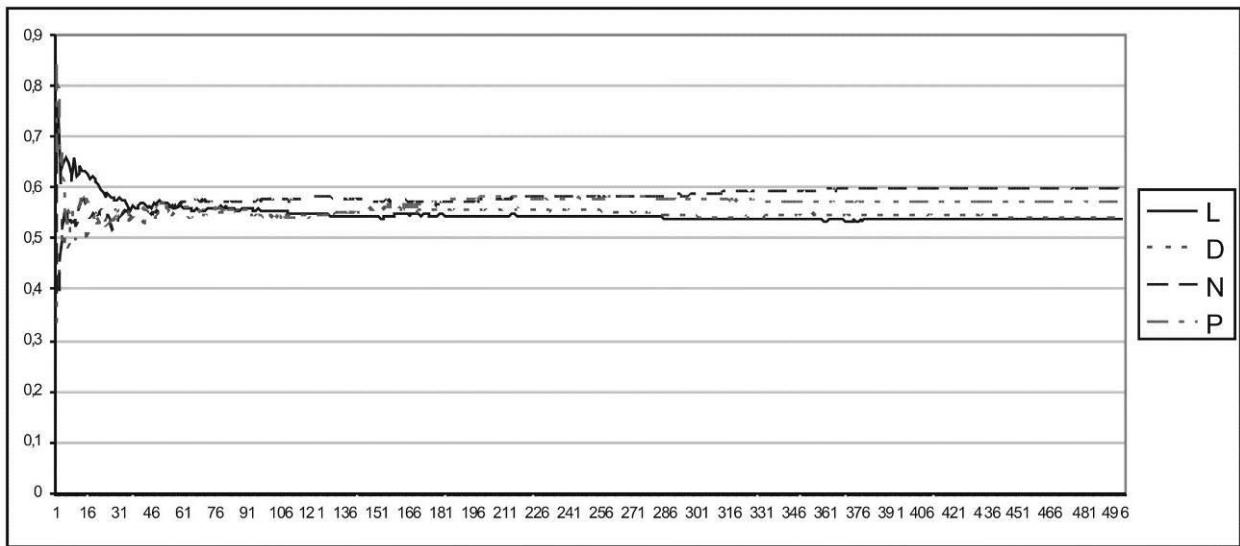
*Рис. 2.20. Среда с интенсивными переключениями. Преимущество у "доверчивого" автомата – сангвиника*

**3. Эксперимент L33.** Характеристики составной среды:  $a=0.75$ ,  $\delta=0.6$ , тип матрицы – "переключатель". Среда характеризуется большей скоростью переключения сред, т.е. является менее предсказуемой (Рис. 2.21). В такой среде, очевидно, необходима большая скорость переключения тактик автомата, т.е. увеличение глубины памяти автомата оказывается отрицательно. Здесь преимущество получает автомат  $L_{ff}$  – холерик.



*Рис. 2.21. Среда с очень интенсивными переключениями. Преимущество у "неврастенического" автомата L3 – холерика*

**4. Эксперимент PN.** Характеристики составной среды:  $a=0.75$ ,  $\delta=0.75$ , тип матрицы – "переключатель". Среды переключаются достаточно интенсивно, матожидание сильно выражено. Здесь преимущество получают недоверчивый и пессимистический автоматы N и P, т.е. флегматики (Рис. 2.22).



*Рис. 2.22. Среда с интенсивными переключениями. Преимущество у "недоверчивых" автоматов N и P – флегматиков*

Сведем это в таблицу, в которой определены параметры составных сред (степень стохастичности, частота и тип переключения между средами) и описание их характера.

Табл. 2.4. Сводная таблица экспериментов

Эксперимент	$\alpha$	$\delta$	Тип матрицы $\Delta$	Характер
LD	0.2	0.99	Стационарный	L – меланхолик
D	0.5	0.90	Переключатель	D – сангвиник
L33	0.75	0.6	Переключатель	$L_{ff}$ – холерик
PN	0.75	0.75	Переключатель	N и P – флегматики

Итак, было показано, что для каждой среды можно выбрать наиболее подходящий для нее автомат, причем подходящий – в терминах темперамента. (Интересно, что в [Варшавский, Поспелов, 1984] приведены весьма образные характеристики поведения автоматов – "доверчивый", "недоверчивый"…). Осталось определить, что это значит – "подходящий". Речь идет о том, что необходимо задать некий функционал качества. Отчасти этот вопрос близок (по аналогии) к показателям качества переходного процесса. В качестве такого показателя можно рассматривать время регулирования, т.е. минимальное время, по истечении которого регулируемая величина будет оставаться близкой к установившемуся (асимптотическому) значению с заданной точностью; можно также рассматривать перерегулирование, т.е. максимальное отклонение переходной характеристики от установившегося значения, или иные характеристики.

С практической точки зрения наиболее подходящим показателем является аналог времени переходного процесса. Дело в том, что само по себе асимптотическое поведение автоматов нас не интересует. Автомат описывает устройство, работающее в реальной среде в реальном времени, поэтому скорость его адаптации крайне важна. Именно поэтому время моделирования во всех экспериментах составляло всего лишь 5000 тактов.

Определение показателя качества, основанное на аналогии со временем регулирования, может быть осуществлено следующим образом. Поскольку определить аналитически матожидание выигрыша как базовой величины в конкретной составной среде для конкретного автомата представляется крайне сложной задачей, то можно в качестве этого базиса использовать значение эффективности некоторого эталонного автомата  $A_E$ , работающего в этих же условиях. В качестве эталона можно выбрать, например, автомат с линейной тактикой или автомат, совершающий все свои действия равновероятно (это согласуется с понятием целесообразного поведения). Тогда показатель эффективности  $T_A$  текущего автомата будет определяться так:

$$T_A: \varepsilon_A(t) < \varepsilon, t \geq T_A$$

где  $\varepsilon_A(t) = \left| \frac{\eta_A(t) - \eta_E(t)}{\eta_E(t)} \right|$ , а величина  $\varepsilon$  задана и составляет, например, 10-20%, как в промышленной автоматике.

### 2.2.7. Темперамент и коллективное поведение

Итак, мы определили условия, при которых становится значимой роль темперамента с точки зрения индивидуального поведения.

Другой аспект этих исследований относится к групповой робототехнике. Уже говорилось, что одной из целей ГР является создание группы роботов, которые могут кооперироваться для совместного решения отдельных задач. В основном в задачах ГР рассматривается группа одинаковых индивидов или агентов. Однако иногда успешное решение задачи требует группы роботов с различной "психической" организацией: меланхолическими, холерическими, сангвиническими 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. Выполнение описанных экспериментов подтвердило целесообразность использования набора роботов с разным темпераментом. При этом

гораздо проще и правильнее оценивать поведение роботов, сравнивая между собой именно характер их поведения, т.е. темперамент.

Следующий пример – колония муравьев, любимый объект роевой или групповой робототехники. У животных, живущих группами, таких как муравьи, разделение труда или профессиональных обязанностей зависит от их индивидуальных характеристик, их психологии или физиологии. И эти индивидуальные характеристики могут быть определены в терминах темперамента.

Особенностью исследований в области ГР является то, что в них основное внимание уделяется механизмам взаимодействия роботов, а не их индивидуальным характеристикам и физиологическим чертам. Например, в [Hecker и др., 2012] показано, что робототехнические рои способны исследовать неизвестную окружающую среду без наличия априорных предварительных знаний о ней. Некоторые технические аспекты разделения труда, обусловленные особенностями индивидов, обсуждаются в [Labella, Dorigo, Deneubourg, 2006], но основное внимание там сосредоточено на обучении в коллективном поведении. Тем не менее, в различных средах с неизвестными характеристиками 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.

Попробуем обосновать эти достаточно очевидные и интуитивно понятные рассуждения, используя более формальный подход. Итак, рассмотрим вопрос о применимости автоматных моделей к описанию коллективного поведения группы различных по своему поведению автоматов (роботов, агентов).

Коллективная организация характеризуется тем, что члены группы, как минимум, выполняют некоторую согласованную работу и имеют некую общую цель. 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 – темперамента. 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 достигнута общая цель.

При такой постановке наша задача сводится к некоторой игре в размещения. Пусть имеется  $m$  кормушек. Каждой из них соответствует своя сложная среда. Задача сводится к распределению автоматов  $A_i$  по кормушкам с максимизацией общего выигрыша (игра с общей кассой). Важно, что разные по темпераменту автоматы (агенты) по-разному ведут

себя в этих средах. Существует среда, наиболее благоприятная для флегматика, сангвиника, холерики и даже меланхолика. Каждая среда – это своя задача. Более формально общая задача может быть описана так.

Пусть имеется множество игроков – автоматов  $A_i$ ,  $i=1,2,\dots,n$ . В отличие от [Цетлин, 1969] зададим игру в виде множества  $E=\{E_1, E_2, \dots, E_m\}$ , где каждый элемент множества представляет собой пару  $E_i=(K_i, w_i)$ . Здесь  $K_i$  – составная среда, а величина  $w_i$  – это т.н. 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 [Цетлин, 1969], однако при этом подразумевается, 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. Разумеется, рассмотренная модель не может не быть ограниченной. Например, когда мы говорим не об абстрактных агентах, а о реальных роботах, то подразумевается, что действия робота оказывают влияние на среду, в которой этот робот пребывает. В этом смысле действия автомата должны были бы, в общем случае, инициировать переключение сред, т.е. свойства среды должны быть не постоянны, а зависеть от поведения агента-автомата. Конечно, в каком-то смысле распределение автоматов по задачам приводит к перераспределению ресурсов кормушек, однако такое влияние не может считаться исчерпывающим.

Итак, предложенная автоматная модель показывает, что, во-первых, различные по своему темпераменту агенты (автоматы) имеют различные показатели качества в тех или иных средах. И, во-вторых, эта модель позволяет достаточно адекватно описать ситуацию с распределением ролей в коллективе роботов в зависимости от их характера поведения. Это, в свою очередь, позволяет сделать вывод о важности роли темперамента для задач организации коллективной работы роботов.

## Формальное описание системы управления

Необходимо подчеркнуть, что проведенные эксперименты по определению особенностей поведения носили в основном качественный и иллюстративный характер. Статистическая обработка результатов, факторный анализ, выявление ошибок, зависимостей и пр. является предметом дополнительных исследований. Это связано с тем, что в некотором смысле мы имеем дело с "психическими" или "ментальными" процессами, в основе изучения которых лежат наблюдения и, в особенности, качественные и грубые оценки.

Здесь следует отметить один важный момент. Действительно, мы можем описывать поведение робота с точки зрения теории управления. Можно использовать такие понятия, как регуляторы, временные задержки, коэффициенты обратной связи и т.д. Но лучше всего для определения особенностей и характеристик поведения роботов подходят такие термины, как эмоции, темперамент и т.п. В этом случае мы можем построить более объективные и содержательные модели. Еще раз подчеркнем, что языком физиологии описывать поведение робота удобнее и легче. Например, этот подход активно применяется для "машинок" Брайтенберга [Braitenberg, 1984], в роевой робототехнике [Kuremoto и др., 2010] и даже в т.н. BEAM-робототехнике (если, разумеется, избегать явных спекуляций и жонглирования терминами).

Тем не менее, можно предложить некоторое формальное представление системы управления эмоционального робота в виде общей структурной схемы, задача которой – дать общее представление о компонентах системы и связях между ними. Представление модели (2.11)-(2.15) в виде некоторой структурной схемы приведено на Рис. 2.23.

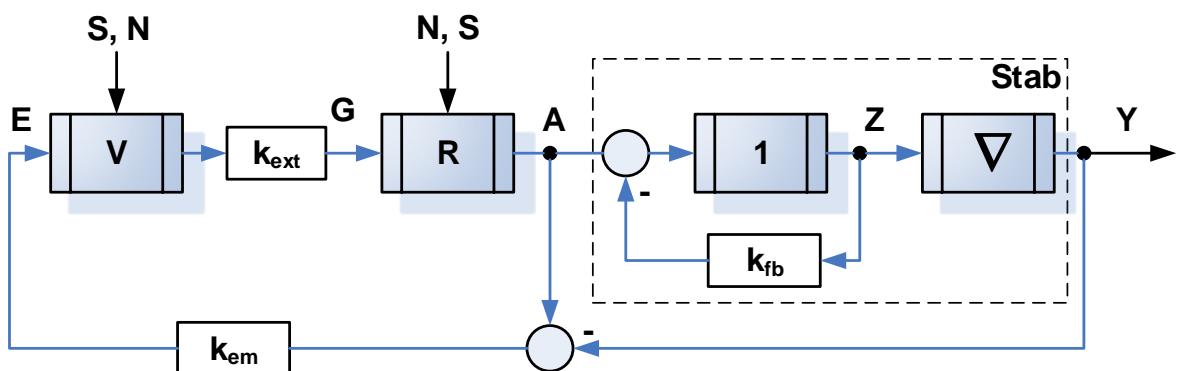


Рис. 2.23. Представление модели системы управления в виде структурной схемы

Отсюда видно, что фактически эмоция  $E$  является элементом контура обратной связи. Здесь стабилизация (2.12)-(2.14) представлена выделенным блоком  $Stab$ . Кроме того, на схеме изображены параметры системы – коэффициенты возбуждения  $k_{ext}$ ,

коэффициент обратной эмоциональной связи  $k_{em}$ , а также коэффициент обратной связи  $k_{fb}$  в блоке стабилизации.

Важным моментом является наличие в блоках вычисления  $V$ ,  $R$ ,  $I$  и  $\nabla$  инерционности, реализуемой, например, процедурой скользящего среднего с шириной окна  $k_{inh}$ . Это позволяет, во-первых, реализовать низкочастотную фильтрацию сигналов. А во-вторых, значение  $k_{inh}$  вкупе с величиной  $k_{ext}$  задают параметры торможения и возбуждения соответственно. А это уже непосредственно относится к определению параметров *темперамента* поведения робота [Карпов, 2014]. Кроме того, из приведенной схемы становятся понятными интерпретации стабилизирующей, контрастирующей и прочих аспектов и ролей эмоций, но уже в терминах технической системы.

Смысл приведенной на Рис. 2.23 схемы заключается в том, чтобы представить качественное или функциональное описание архитектуры системы управления (Рис. 2.3 и Рис. 2.9) в формальных терминах классической теории автоматического управления. В свою очередь, этот формализм позволяет, рассматривая архитектуру робота с позиций теории управления, решать задачи наблюдаемости и, что важнее, управляемости объектом, см., например, [Дорф, Бишоп, 2002]. Именно аспект управляемости будет рассмотрен ниже, в разделе "Феномен паразитического управления".

### **2.3. 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 (*ММ*), 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 тесно связано понятие картины мира (КМ). КМ – это модель мира, в которой присутствует т.н. субъект деятельности [Осипов и др., 2018]. Собственно, субъект деятельности и есть то, что мы далее называем самосознанием или субъективным *Я* (*C.Я.*, *subjective self*). Далее мы будем использовать оба этих термина – ММ и КМ почти синонимично.

В определенном смысле картина мира может рассматриваться как некоторая надстройка над базовым стимул-реактивным уровнем. С архитектурной точки зрения, это тот компонент, который реализует воздействие на сенсорную систему, определяет

значимость тех или иных потребностей и, таким образом, изменяет характер поведения системы, ее целеполагание и пр. Условно это можно изобразить так, как показано на Рис. 2.24.

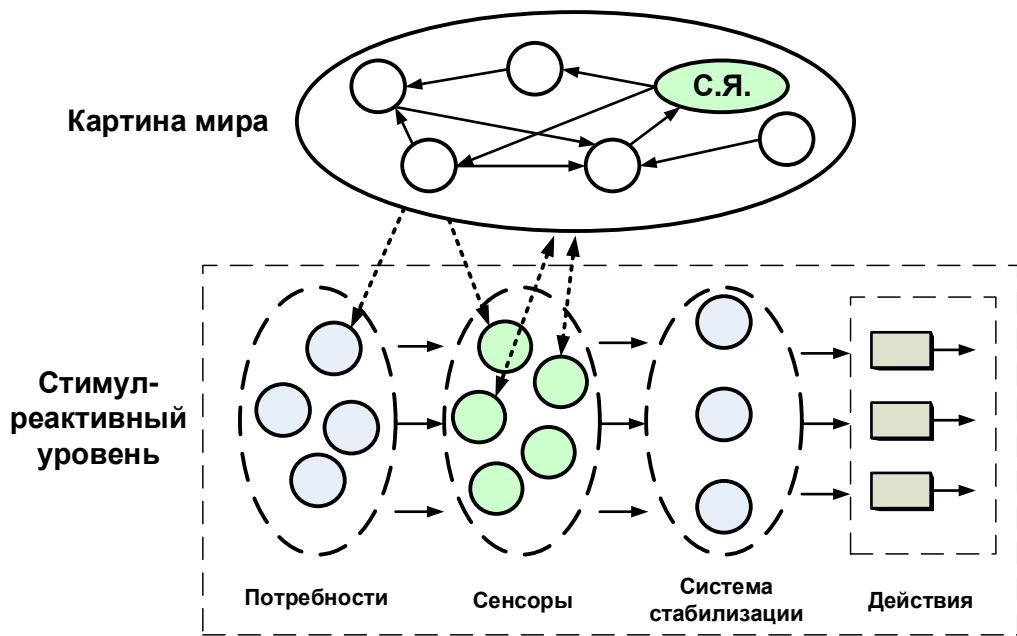


Рис. 2.24. Картина мира как надстройка над базовой схемой

Несмотря на то, что КМ – это прерогатива сложной, интеллектуальной системы, можно реализовать модель мира и механизмы С.Я. простыми средствами, допускающими их воплощение на базе агентов с ограниченными когнитивными способностями, т.е. на весьма скромном программно-аппаратном уровне [Карпов, 2012]. Очевидно, что здесь и далее КМ понимается в несколько "механистическом смысле".

**Замечание.** Говоря о картине мира, обычно под субъектом-носителем КМ понимается человек. Более того, Дж. Хокинс (цит. по [Осипов и др., 2018]) полагает, что основным инструментом построения картины мира субъекта является кора головного мозга, реализующую т.н. временную иерархическую память (ИВП). Модели ИВП способны реализовать практически все существенные для построения КМ принципы. Настоящее же исследование, напротив, ставит одной из своих задач обосновать необходимость наличия КМ или ММ у агента с ограниченными когнитивными способностями – анимата или робота.

### 2.3.1. Модель мира и субъективное Я

Будем рассматривать С.Я. как компонент модели, описывающей отношения между объектами окружающего мира. Модель мира, согласно [Аверкин, Гаазе-Рапопорт, Поспелов, 1992], – 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 компонент модели, с которой работает система управления, и есть то, что можно назвать *С.Я.* В работе [Редько, 2009] описывается 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 рассматривалось как сознание субъективной реальности.

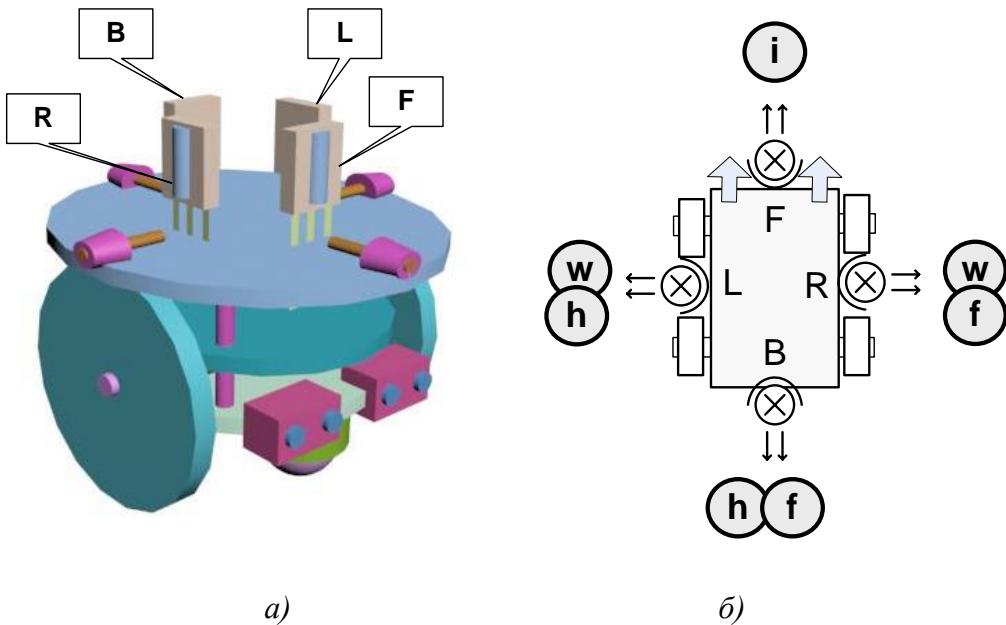
Далее приводится иной механизм, описывающий эти понятия. Пусть для робота окружающий мир в некоторый момент времени  $t$  описывается отношением  $R(t)$  между его датчиками и наблюдаемыми объектами (например, отношение "видеть", "детектировать" и т.п.). Когда робот совершает какое-нибудь действие, наблюдаемая 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, определяющими, насколько значения датчиков изменятся на следующем шаге.

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

$$R(t + 1) = M_a^T R(t) \quad (2.17)$$

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.

Рассмотрим следующий пример. Пусть имеется мобильная платформа, снабженная датчиками, позволяющими детектировать объекты, находящиеся спереди, сзади, слева и справа от нее, Рис. 2.25.



*Рис. 2.25. а) расположение датчиков на роботе, б) робот наблюдает объект i передним датчиком (F), объекты w и h – левым (L) и т.д.*

Пусть в некоторый момент времени робот видит передним датчиком ( $F$ ) объект  $i$ , левым ( $L$ ) – объекты  $w$  и  $h$ , правым ( $R$ ) – объекты  $w$  и  $f$ , задним ( $B$ ) – объекты  $h$  и  $f$ .

Ниже представлена матрица наблюдений  $R$ , а также матрицы преобразований, соответствующих действиям "поворот направо" ( $M_r$ ) и "движение вперед" ( $M_f$ ).

$$R = \begin{bmatrix} w & i & h & f \\ F & 0 & 1 & 0 & 0 \\ B & 0 & 0 & 1 & 1 \\ L & 1 & 0 & 1 & 0 \\ R & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad M_r = \begin{bmatrix} F & B & L & R \\ F & 0 & 0 & 1 & 0 \\ B & 0 & 0 & 0 & 1 \\ L & 0 & 1 & 0 & 0 \\ R & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad M_f = \begin{bmatrix} F & B & L & R \\ F & 1.5 & 0 & 0 & 0 \\ B & 0 & 0.5 & 0 & 0 \\ L & 0 & 0 & 1 & 0 \\ R & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Тогда сложное действие "поворот направо" + "шаг вперед" будет выглядеть так:

$$R_{r+f} = M_f^T (M_r^T \cdot R)$$

### **2.3.2. Работа с моделью мира**

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

$$\mu(R(t+n), C(t)) \quad (2.18)$$

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 выражению (2.17), рассматриваются все возможные действия на  $n$  шагов в глубину. Результирующее (прогнозируемое) отношение  $R(t + n)$  оценивается. Исходя из результатов оценки (2.18), окончательно выбирается действие, приводящее к наиболее благоприятному исходу.

Итак, теперь 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. К вопросу о конструктивных аспектах субъективного Я мы еще вернемся, когда будем рассматривать вопросы подражательного поведения.

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, здесь и далее термин "муравей" должен рассматриваться большей частью 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. И 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 модель муравья, как конечная цель исследования – это своего рода химера, т.е. искусственный объект, созданный из моделей-фрагментов, описывающих или относящихся к совершенно иным живым существам. Большой 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, как метафорический муравей (точнее – колония муравьев), жизнеспособна с технической точки зрения.

## 2.4. Архитектура анимата

Как эмоционально-потребностная схема (Рис. 2.3), так и система с "темпераментным" компонентом (Рис. 2.9) определяют в результате, какое поведение будет реализовывать анимат. Как уже говорилось выше, термин поведение трактуется как некоторая характерная, повторяющаяся последовательность действий (или комплексов действий – ФКД). С технической точки зрения реализация действий (простых, сложных, вплоть до ФКД) удобна с помощью конечных автоматов. Для реализации поведения требуется уже другой, более сложный механизм. Таким механизмом может быть метаавтомат.

**Мета-автомат.** Суть его работы заключается в том, чтобы, в зависимости от результатов анализа состояния внешней и внутренней среды, активизировать тот или иной автомат, реализующий некоторое действие. На Рис. 2.26 приведен в качестве примера фрагмент мета-автомата, реализующего одну из моделей пищевого поведения анимата (о пищевом поведении будет сказано в Главе 4).

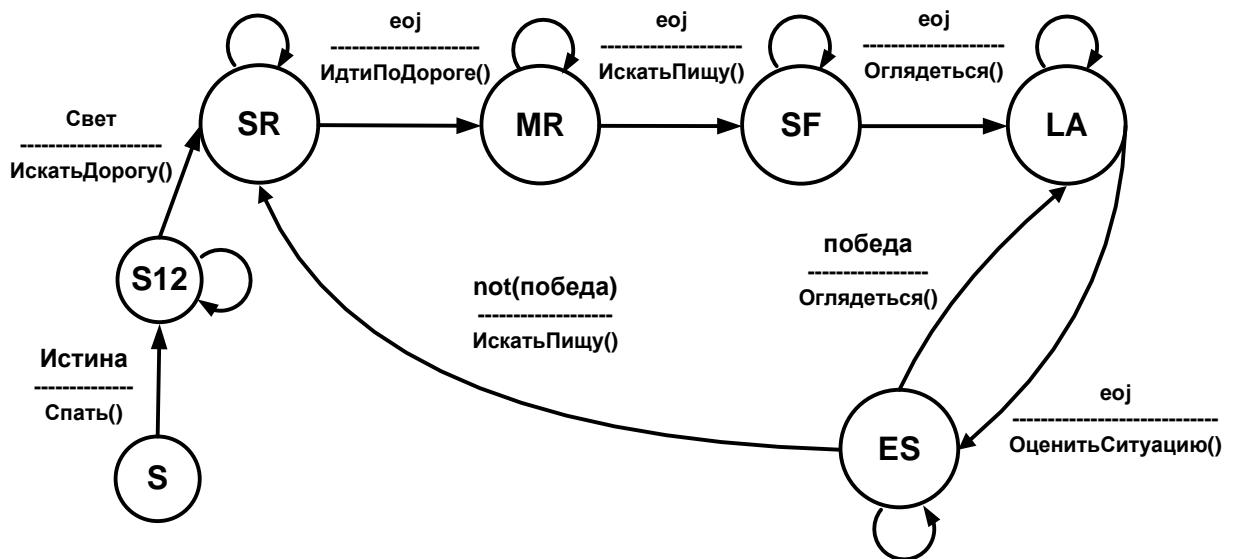


Рис. 2.26. Мета-автомат, реализующий стратегию пищевого поведения

В данном случае мета-автомат представляет собой автомат Мили, у которого пометки дуг (процедуры) определяют выполняемые аниматом действия. Выполнение этих процедур ("Спать", "ИскатьДорогу", "ОценитьСитуацию" и пр.) заключаются в том, что загружаются соответствующие автоматы, т.е. автоматы, реализующие действие "Сон", "Поиск дороги" и т.д. Условия переходов (загрузки новых автоматов) определяются,

например, сенсорикой анимата. Или, как в приведенном примере, может использоваться условие завершения текущего автомата, реализующего некоторое действие (условие *eof*).

Таким образом, мы получаем следующую иерархию компонентов архитектуры (в порядке усложнения):

1. Уровень действий. Реализуется множеством конечных автоматов. При этом для простоты можно полагать, что в каждый момент времени активен только один – текущий – автомат, т.е. анимат не может совершать несколько действий одновременно.
2. Уровень поведения. Поведенческие реакции как последовательности действий; определяются мета-автоматами.
3. Рефлекторный регуляционный уровень. Реализуется эмоционально-потребностной схемой. На выходе – выбор поведения, т.е. активизация соответствующего выбранному поведению мета-автомата.

**Замечание.** На самом деле в работе используется многоуровневая мета-автоматная схема управления. Если действиями автомата (КА) являются активизации низкоуровневых двигательных функций, то мы считаем его автоматом уровня  $0 - M^0$ . Мета-автомат уровня  $1 M^1$  – это КА, действия которого заключаются в управлении автоматами  $M^0$  (запуск, останов, возобновление работы). Таким образом, мета-автомат уровня  $n M^n$  управляет автоматами уровня  $M^{n-1}$ . Введение понятия мета-автомата – это структуризация иерархии управления в автоматном представлении. Основа автоматов всех уровней – это КА с выходом.

Эта архитектура, повторим, соответствует низшему (базовому) уровню организации – рефлекторному. Дальнейшее развитие организации СУ определяется такими надстройками, как организация знаковых (семиотических) уровней.

Если рассуждать об уровнях организации нервной системы в смысле Н. Бернштейна, то речь здесь идет об уровне D – уровне действий (более строго – теменно-премоторный уровень действий (D)). Этот уровень обеспечивает выполнение действий – целых цепочек последовательных движений, которые все вместе решают ту или другую двигательную задачу [Бернштейн, 1990]. О значимости этого уровня достаточно красноречиво говорится в упомянутой работе Бернштейна: "*В процессе эволюции соматической системы <...> определяющим звеном являются все же эффекторные функции. Судьбу индивидуума решают его действия. Рецепторика здесь представляет собой уже подсобную функцию. <...> Нигде в филогенезе созерцание мира*

*не фигурирует как самоцель. Они [рецепторы] процессуально обеспечивают полноценную координированную работу эффекторов".*

С точки зрения схемы познавательных процессов Бернштейна-Величковского, мы имеем дело с уровнем (*D*), который ответственен за ориентацию в ближайшем окружении и включает схематическую организацию знаний и семантические контексты действий, часть из которых врожденная, а значительная часть приобретена жизненным опытом и специальным обучением [Величковский, 2006], [Фаликман, Печенкова, 2016].

Итоговая обобщенная архитектура системы управления анимата приведена на Рис. 2.27. Во избежание ненужных ассоциаций с уровнями Бернштейна-Величковского заметим, что уровни нашей архитектуры обозначены буквами *E, A, B, R, C*, и эти обозначения несут совершенно иной, сугубо "технический" смысл.

**E.** Эффекторный уровень. Здесь реализуются движения, базовая эффекторная деятельность. Движение понимается в более широком смысле, чем перемещение в пространстве. Это – элементарные воздействия на окружающую среду.

**A.** Уровень действий. Реализуется с помощью конечных автоматов. В определенном смысле мы можем определить действие как последовательность воздействий, которая может быть описана конечным автоматом.

**B.** Уровень поведения. Реализуется с помощью мета-автоматов.

**R.** Регулятивный уровень. Это – та эмоционально-потребностная схема, которая обсуждалась выше.

**C.** Когнитивный уровень. Часть, ответственная за отображение сенсорных и потребностных элементов. Именно этот уровень называется моделью (картиной) мира, здесь формируется мотивация и целеполагание, здесь осуществляется планирование и т.п. Реализуется семиотическими моделями.

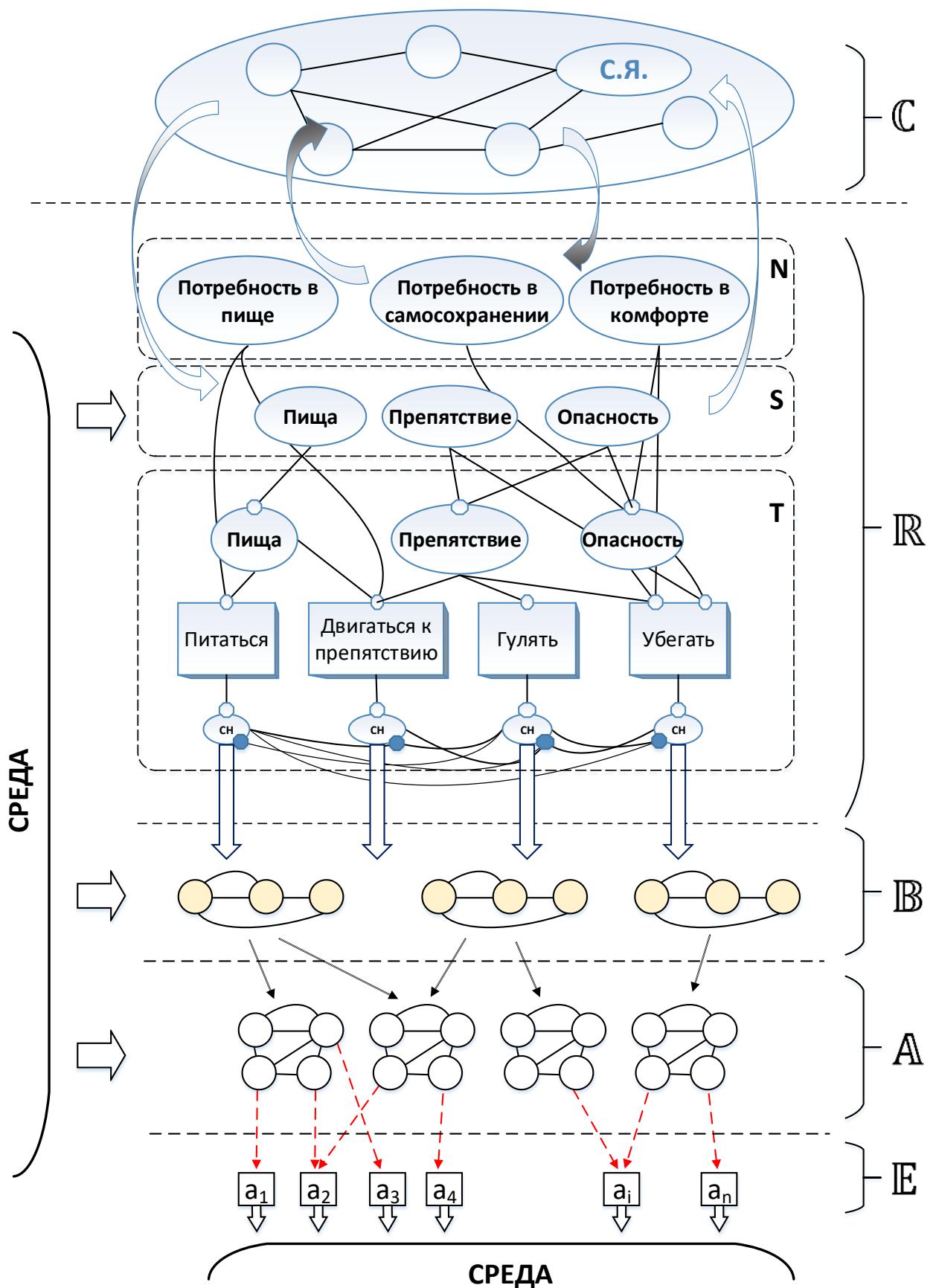


Рис. 2.27. Обобщенная архитектура системы управления анимата

Важно отметить, что уровни  $\mathbb{E}, \mathbb{A}, \mathbb{B}$  и  $\mathbb{R}$  относятся к рефлекторному – нижнему – уровню управления. На уровне  $\mathbb{R}$  выделяются потребностная ( $N$ ), сенсорная ( $S$ ) и стабилизирующая ( $T$ ) части. Разумеется, подобное деление является условным, введенным для удобства описания и, отчасти, удобства технической реализации.

Формально это можно описать так. Пусть  $Y_{eff}$  – вектор выходных эффекторных воздействий анимата на среду. Его формирование определяется результирующим выходом последовательности  $n+1$  мета-автоматов  $M^k, k=0..n$ .

$$Y_B \xrightarrow{a} M_i^n \xrightarrow{a} M_j^{n-1} \xrightarrow{a} \dots \xrightarrow{a} M_k^0 \xrightarrow{a} Y_{eff}$$

Здесь  $Y_B$  – вектор активации мета-автомата, определяющего выбранное актуальное поведение,  $\xrightarrow{a}$  – отношение непосредственного автоматного управления, задаваемое соответствующими функциями выхода автоматов  $\lambda$ :

$$Y^k = \lambda(Q^k, S^k), S^k = X \cup f(Q^{k-1})$$

где  $Q^k, S^k$  – состояния и входной алфавит мета-автомата уровня  $k$  соответственно. При этом  $S^k$  определяется как объединение внешних сигналов (сигналов среды) и текущего состояния подчиненного автомата уровня  $k-1$ .

Вектор активации поведения  $Y_B$  задается функционированием регуляторного уровня  $\mathbb{R}$ :

$$Y_B = \mathbb{R}(S, N, G)$$

где  $S, N, G$  – сенсорные сигналы, потребности и вентильные элементы эмоционально-потребностной схемы.

Задача когнитивного уровня  $\mathbb{C}$  – формировать целенаправленное поведение агента, при этом воздействие на регуляторный уровень осуществляется опосредованно, через элементы  $G$  (сенсорика и потребности – это фиксированный, "аппаратный" уровень архитектуры):

$$G = \mathbb{C}(S, N)$$

В итоге получаем:

$$\mathbb{R}(S, N, \mathbb{C}(S, N)) \xrightarrow{M} Y_{eff}$$

Здесь  $\xrightarrow{M}$  – транзитивное замыкание отношения автоматного управления  $\xrightarrow{a}$ .

Следует сделать важное замечание. Большое внимание, уделяемое в настоящем исследовании рефлекторному уровню, определяется не тем, что это – самый простой и понятный уровень. И не тем, что на этом уровне реализуется множество базовых механизмов социального поведения (включая элементы языкового взаимодействия). Этот базовый уровень как раз очень сложен. Именно в нем сосредоточены основные механизмы поведения (центр тяжести результатов развития эволюции, если говорить об

аналогиях с живой природой). У того же муравья на "когнитивную" часть отведено меньше половины нейронов – те, что сосредоточены в надглоточном ганглии ([Длусский, 1967]). "Когнитивная" надстройка может быть весьма простой. Как будет показано ниже, для управления целостным поведением могут использоваться достаточно примитивные механизмы.

О том, как такая архитектура определяет особенности решения "прикладных" задач, будет говориться в следующих главах, посвященных особенностям манипулирования индивидуальным поведением и поведением всего социума.

## 2.5. Выводы к главе 2

Итак, в этой главе был рассмотрен вопрос создания нижнего уровня архитектуры системы управления анимата. В основе разработанной архитектуры лежит эмоционально-потребностная модель, реализующая феномены эмоционального и темпераментного поведения роботов. Кроме того, были рассмотрены вопросы, касающиеся необходимости и технической целесообразности введения и реализации таких понятий, как модель мира и субъективное Я уже на уровне архитектуры простейшего анимата. Было показано, что эти биологические инспирированные механизмы могут быть реализованы достаточно простыми и естественными способами.

**Примечание.** Это аспект – простота – для роевой робототехники, в которой особи обычно имеют ограниченные когнитивные способности, иногда выделяется особо. Например, возможностей микроконтроллера ATmega328 достаточно для реализации всех описанных механизмов. Однако, как мы старались показать, простота устройства индивида – это спорный вопрос. Более того, важный вывод настоящего исследования заключается в обратном: особь, способная к социальному поведению и взаимодействию, не может быть простой, примитивной, не требующей определенного когнитивного уровня развития.

Самым проблемным вопросом, обсуждаемым в этой главе, является вопрос модели или картины мира. С одной стороны, в ИИ картина мира стала конкретным, конструктивным предметом исследования. Операции на множестве образов, значений и смыслов в знаковой картине мира описаны, например, в работе [Осипов и др., 2018]. В настоящем же исследовании мы имеем дело с достаточно примитивными сущностями – аниматами (роботами), причем рассматриваем их физиологический и в лучшем случае – психический уровень. Говоря о модели мира анимата, мы сводим понятие сознавшего субъекта – С.Я. – лишь к некоторой точке отсчета, хотя одной из основных функций

сознающего субъекта, согласно [Осипов и др., 2018], является целеполагание. В свою очередь, характер процесса целеполагания определяется типом картины мира субъекта. На данный же момент мы можем лишь констатировать, что пути перехода от уровня анимата до уровня индивида, обладающего полноценной (в смысле ИИ) картиной или моделью мира – это вопросы дальнейших исследований.

Основные выводы главы:

1. Была представлена эмоционально-потребностная модель системы управления индивида (робота, анимата). Эта модель реализует особенности нижнего, "физиологического" уровня управления аниматом. Было показано, что регулятивная функция эмоций крайне важна не только для живых организмов, но и для эффективности функционирования технических объектов.
2. Была предложена модель описания поведения робота в терминах темперамента. Модель основана на параметризации эмоционально-потребностной архитектуры.
3. Была предложенная автоматная модель темперамента. Эта модель позволяет определять основные качественные и количественные параметры состава группы роботов для коллективного решения комплексных задач.
4. Было показано, что понятия модели мира и субъективного *Я* являются прерогативой не только интеллектуального робота, но имеют важное значение для функционирования анимата с реактивной структурой.

## ГЛАВА 3. МЕХАНИЗМЫ СОЦИАЛЬНОГО ПОВЕДЕНИЯ

Прежде чем приступить к рассмотрению механизмов, обусловливающих социальное поведение, сделаем важное замечание: взаимодействие между членами группы должно иметь локальный характер. Далее будет введен некий формализм, позволяющий описывать процедуры взаимодействия между членами группы – модель статического роя, а также представлены варианты решения ряда задач – феноменов социального взаимодействия. От феномена языкового общения до механизмов управления поведения, основанном на эффекте паразитического манипулирования. Это – сугубо поведенческий подход, принципиально отличающийся от "технического", при котором модели взаимодействия в группах роботов отражают функциональные связи между компонентами робототехнической системы, см., например, [Нго, Ронжин, 2019].

### **3.1. Локальное взаимодействие**

Одной из принципиальных особенностей роевой робототехники является локальный характер взаимодействия роботов друг с другом, а также роботов со средой [Zhiguo и др., 2012]. Важнейшим видом взаимодействия является коммуникация. При этом коммуникация может быть как явной – в виде непосредственного обмена сообщениями между агентами, так и неявной (*implicit communication*) [Yogeswaran, Ponnambalam, 2010]. Примеры неявной коммуникации – это наблюдение друг за другом, оставление знака, который может быть найден и опознан другими (феромонный след муравья, например) 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 [Павловский, Кирикова, Павловский, 2010] до весьма экзотических. Например, в [Dewi, Risma, Oktarina, 2012] 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, [Степанюк, 2004].

### 3.2. Статический рой

Одной из моделей, описывающих организацию множества локально взаимодействующих агентов или роботов, является так называемый *статический рой*. Статический рой характеризуется отсутствием изначально заданного управляющего центра и представляет собой некую фиксированную в данный момент времени сеть – совокупность агентов [Карпов, 2013]. Формирование неоднородностей, выбор лидера, организация взаимодействия и пр. – это задачи, решаемые на данной структуре. 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 (как и проявление эмерджентных свойств системы) предполагает наличие неоднородности в группе. Это означает дифференциацию выполняемых агентами функций: стратегическое и тактическое управление, сбор и обработку информации, реализацию эффекторных функций и т.п.

Считается, что агенты имеют фиксированное число коммуникационных портов – точек контакта, позволяющим им устанавливать каналы обмена информации. На Рис. 3.1 условно изображен пример статического роя в виде сети взаимодействующих агентов.

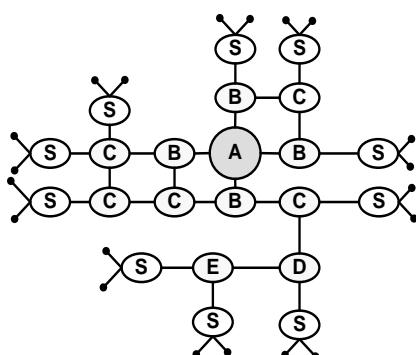


Рис. 3.1. Пример организации сети

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). Формирование управляющего центра будет описано ниже.

*Обоснование введения понятия статического роя* обусловлено следующими соображениями. Одной из базовых форм организации групп роботов является рой – однородная совокупность роботов, между которыми имеется локальная связь. Если созданы условия, при которых связи между членами группы – роя – могут считаться постоянными на некотором интервале времени, то мы получаем структуру, в которой, с одной стороны, имеется возможность организации совместных сетевых вычислений (своего рода – вычислительная сеть с фиксированной топологией). С другой стороны, эта система может обладать всеми свойствами, присущими группе роботов (активность, движение, сбор информации, взаимодействие со средой и пр.). Исходя из этого, статический рой может рассматриваться как понятие, включающее в себя вычислительную сеть.

Для статического роя был разработан ряд методов, реализующих задачи хранения информации и организации запросов к ней, выполнения согласованных двигательных функций и пр., [Карпов, 2013]. Предполагается, что агенты – элементы статического роя – хранят множество утверждений  $c_i$ , которые могут рассматриваться либо как факты, либо как логические выражения, импликации вида

$$c_1 \& c_2 \& \dots \& c_n \rightarrow f \quad (3.1)$$

Эти множества утверждений образуют базы данных (БД) агентов. Пусть некий инициирующий узел пытается отработать интересующее его правило вида (3.1). Этот 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. 3.2 изображен фрагмент процесса распространения запроса в сети.

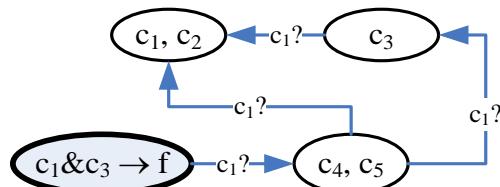


Рис. 3.2. Запрос конъюнкта  $c_1$

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

В статический рой способен решать и более сложные задачи, чем организация запросов. Так, в работах [Воробьев, 2015] и [Воробьев, 2018] показана возможность организации логического вывода на множество агентов в статическом рое. В основе такого вывода лежит процедура поиска в ширину, позволяющая решать задачи категории не только исчисления высказываний, но и логического вывода на уровне предикатов первого порядка.

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 инициирующий узел.

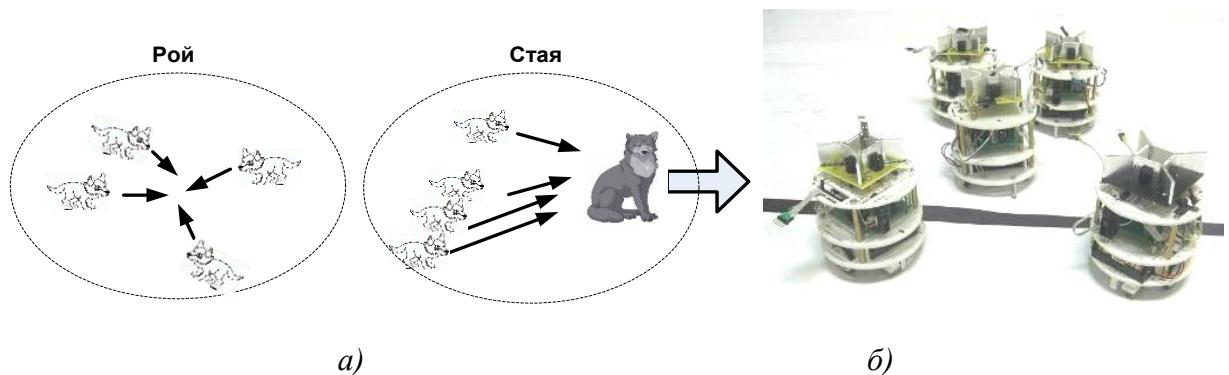
### **3.3. Определение лидера в группе**

В подавляющем большинстве работ в области роевой робототехники предполагается априори заданный лидер. Причем чаще всего этот лидер задает движение роя. Вообще, подавляющее число примеров решения задач в области роевой робототехники касается именно согласованного движения роя. В [Zhiguo и др., 2012] эта очевидная и достаточно простая задача выделена как метод "Следование за лидером" ("Leader-Follower Method"). Интересно, что классической работой, в которой определяются принципы стайного движения является статья К. Рейнольдса [Reynolds, 1987], была посвящена не роботам, а вопросам анимации в компьютерной графике (замечательно, что в этой наиболее цитируемой работе нет ни одной формулы).

Значительно реже лидер определяется, исходя из иных, не априорных соображений. Например, в [Даринцев, 2006] описывается динамическое выделение агентов-координаторов (лидеров), основанное на "геометрических" построениях; лидерами групп становятся роботы, ближе всех расположенные к месту проведения некоторых технологических действий. В работах В.Г. Редько [Редько, 2006], [Редько, 2009] 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 (стae) 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 также, например, в [Костенкова, Никольская, 2004]. Однако нас здесь интересуют такие методы определения лидера, которые основаны на локальном взаимодействии между особями. При этом существуют два пути определения доминанта: прямое определение лидера или достижение консенсуса путем голосования.

### 3.3.1. Прямое определение лидера. Выделение доминанта

Для определения лидера можно использовать сугубо технический прием. Он позволяет выбрать лидера, например, для решения задачи согласованной стайной охоты [Карпов, 2012]. 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. Поэтому здесь необходим 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 не придерживается правила "Держаться вместе". Он начинает свободный поиск, а все остальные следуют за ним. На Рис. 3.36 изображены роботы, на которых проводились эксперименты по стайному преследованию.



*Рис. 3.3. а) Превращение роя в стаю, б) экспериментальная группировка роботов для отработки стайного поведения*

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.

Формально это описывается следующим алгоритмом поведения агента:

### Алгоритм стайного поведения агента

```

 $\alpha$  - агент,  $W_a$  - вес агента

Procedure  $F1(\alpha)$ 

     $W \leftarrow \{W_i\}$  -- Определение весов соседей  $W$ 
     $W_{max} \leftarrow \max(W)$ ,  $A_{max} \leftarrow \arg \max(W)$ 
    if  $W_{max} > W_a$  then  $MoveTo(A_{max})$  -- Двигаться к агенту  $A_{max}$ 
    else  $MakeSomething(\alpha)$  -- Выполнять собственную поведенческую процедуру
end procedure

```

Очевидно, что временна́я сложность алгоритма определяется как  $T=O(\rho)$ , где  $\rho$  – среднее число соседей агента. Это значительно лучше, чем оценки  $O(N^2)$  или  $O(N)$ , обсуждаемые у Рейнольдса в [Reynolds, 1987], приближаясь к  $T=const$ .

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).

**Примечание. Об играх преследования.** Решение задачи преследования динамической цели изучается в рамках теории дифференциальных игр. Однако в групповой робототехнике такой подход применяется достаточно редко. Это связано, во-первых, с существующими ограничениями на вычислительные ресурсы бортовых систем управления, а во-вторых – с самой постановкой задачи игры преследования, при которой предполагается наличие строгого описания состояния системы и обеспечение управляемости поведения объектов.

**Голосование и управление строем.** Процедуры достижения консенсуса путем голосования, при котором используется локальное взаимодействие агентов со своими соседями, чаще всего используются применительно к задачам управления строем агентов. Например, в работах [Amelin и др., 2013], [Xue, Cai, 2016] упоминаются протоколы голосования для решения задачи распределения заданий в группе агентов – летательных аппаратов (ЛА). Здесь распределение задач используется для прямого управления строем группы ЛА (определение местоположения каждого ЛА). С другой стороны, могут быть использованы иные постановки задачи распределения. Так, в работе [Brandaو, Sarcinelli-Filho, 2016] управление строем сводится к задаче разбиения строя на множество треугольников, рассматриваемых как отдельные объекты управления. Либо иногда рассматриваются задачи оптимизации плана размещения, при котором учитываются факторы безопасного сближения аппаратов в строю.

Нас, однако, интересует более общая постановка задачи.

### 3.3.2. Выбор лидера в статическом рое

Развитием принципа выделения доминанта, основанного исключительно на процедуре локального взаимодействия и ориентации на более сильного соседа, является процедура выбора лидера в статическом рое. Речь идет о том, чтобы агент поступал (выбирал) в соответствии с мнением окружающего его большинства. При этом мы рассматриваем ситуацию, в которой имеется однородная группа роботов.

**Примечание.** Однородность (или гомогенность) группы роботов понимается в двух аспектах. Предельный случай организации группы роботов – это совокупность морфологически (конструкционно) одинаковых устройств. Однаковость членов группировки важна с точки зрения унификации, универсализации, возможности замены (резервирования) и прочих технических аспектов. С другой стороны, однородная совокупность агентов (роботов) с организационной точки зрения не способна решить сложные задачи, требующие дифференциации функций, элементов планирования и пр. В этом смысле требуется, чтобы группа роботов была неоднородной, причем именно с функциональной точки зрения (иерархия подчинения, распределение задач, наличие управляющего – инициирующего – центра и т.д.).

Рассмотрим задачу выявления лидера в более общем случае, с точки зрения механизмов локального информационного обмена между агентами.

Определение лидера в группе агентов – это задача с весьма длительной историей, и решается она самыми разными методами. Так, в работе Kim с соавторами [Kim и др., 2008] выбор лидера группы основан на оптимизации энергопотребления, поэтому необходимо знать расстояния между роботами и мощность, потребляемую при передаче сообщения от одного робота к другому. В [Yu, Jian, Wang, 2008] описывается управление движением роя с использованием центра масс или геометрического центра роя. Этот метод требует, чтобы были известны координаты агентов, их скорость и направление движения. В работе [Loukas и др., 2012], описан локализованный механизм для определения информационного потенциала на каждом узле на основе информации о локальном процессе и потенциала соседних узлов. В этом случае лидером считался узел с минимальным потенциалом.

Еще больше решений, подходов и алгоритмов мы находим в области распределенных вычислений, где требуется определить лидера как координатора некоторой распределенной задачи. Несмотря на то, что имеется широкий ряд алгоритмов для выбора лидера в системах с различной топологией и принципами организации, их непосредственное применение сопряжено с рядом сложностей. Эти сложности связаны,

прежде всего, с ограничениями, накладываемыми на принципы взаимодействия агентов в статическом рое.

Так, отсеивается целое семейство методов, в которых используется синхронный режим работы узлов (см., например, [Attiya, Welch, 2004]); неприемлемыми становятся методы с централизованным управлением; не работают методы, в которых агентам известна топология сети и т.п. Кроме того, из рассмотрения выбывают методы, использующие изощренные протоколы обмена пакетами сообщений, и те, в которых агентам приходится строить различные топологические модели. Речь идет о протоколах типа *Shout*, *Mega-Merger*, алгоритме *Yo-Yo* [Santoro, 2006] и др.

**Выбор в статическом рое.** 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 общая топология сети агентам заранее неизвестна, и все рассуждения должны носить сугубо "локальный" характер, т.е. идти от имени агента, принимающего участие в голосовании.

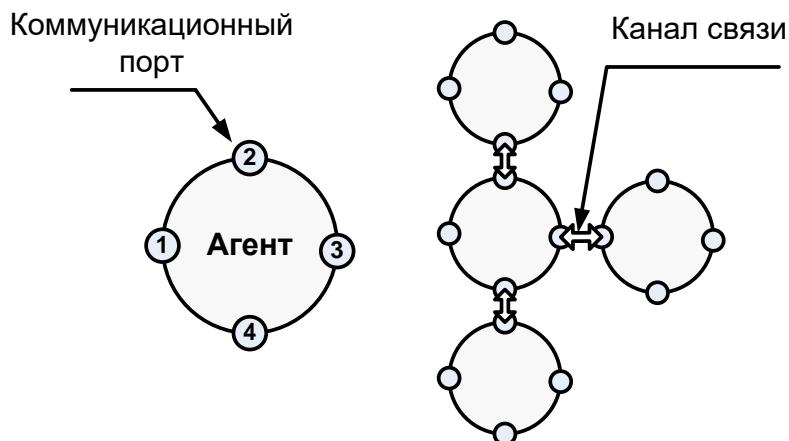


Рис. 3.4. Агенты с четырьмя портами и связи между ними

Каждый агент описывается четверкой

$$A = (\alpha, L, C, W_C) \quad (3.2)$$

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  $\alpha$ ;  $W_C$  – вес кандидата  $C$ , т.е. число голосов, которое, по мнению агента, следует отдать за кандидата. Изначально каждый агент голосует за себя, т.е.  $C=\alpha$ ,  $W_C = W_\alpha = W^0_\alpha$  ( $W^0_\alpha$  – исходный вес агента, показатель его силы, значимости и т.п.). В худшем случае, когда все агенты одинаковы, их веса  $W^0_\alpha$  равны.

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.

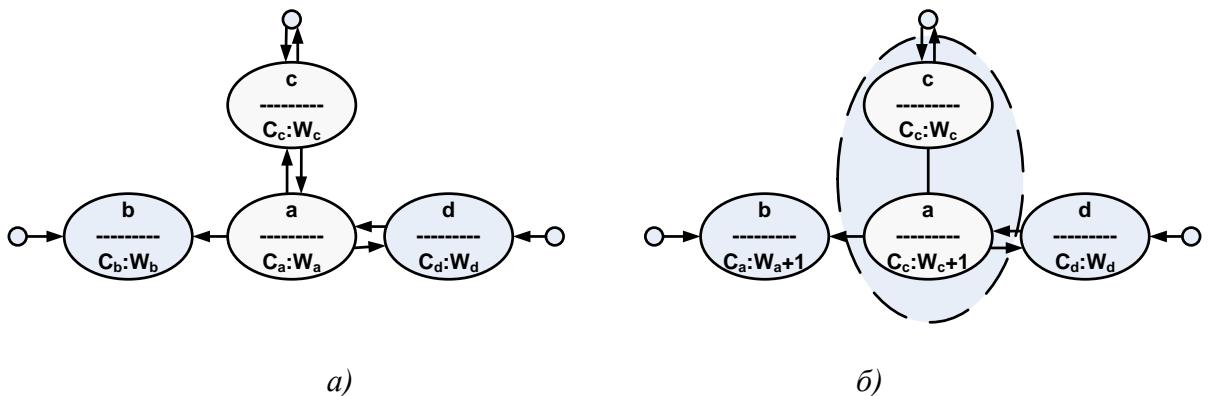


Рис. 3.5. Шаги голосования. *а)* начальное состояние, *б)* итоговое распределение голосов

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.

Алгоритмы поведения агента при голосовании приведены ниже. В алгоритме *G1* выбор определяется вероятностным образом и зависит от веса кандидатов.

#### Алгоритм *G1(a)*. Принятие решения агентом – 1

```

 $\alpha$  – агент
 $C_\alpha$  – кандидат, за которого голосует агент  $\alpha$ 
 $W_\alpha$  – вес кандидата
 $L_\alpha$  – список агентов-кандидатов

```

*Procedure G1 ( $\alpha$ )*

-- Выбор среди соседей оппонента с максимальным весом  $A_{op}$ :

$A_{op} \in L_\alpha, C_{op} \neq C_\alpha$   
 $W_{op} = \max_{i \in L_\alpha} W_i$

-- Вычисление значения вероятности изменения своего мнения:

$$p_\alpha = \frac{W_{op}}{W_\alpha + W_{op}}$$

Изменение мнения с вероятностью  $p_\alpha$ :

```

 $C_a \leftarrow C_{op}$ 
 $W_a \leftarrow W_{op} + 1$ 
end procedure

```

В алгоритме G2 агент безусловно голосует за сильнейшего кандидата.

### Алгоритм G2( $\alpha$ ). Принятие решения агентом – 2

```

Procedure G2 ( $\alpha$ )
Выбор среди соседей оппонента с максимальным весом  $A_{op}$ :
 $A_{op} \in L_\alpha$ ,  $C_{op} \neq C_\alpha$ 
 $W_{op} = \max_{i \in L_\alpha} W_i$ 
if  $W_{op} > W_a$  then -- Оппонент 'сильнее'. Меняем свое мнение:
     $C_a \leftarrow C_{op}$ 
     $W_a \leftarrow W_{op} + 1$ 
else
    if  $W_{op} = W_a$  then -- Силы равны. Изменяем мнение с вероятностью 0.5
         $p \leftarrow \text{rand}()$  -- Случайное значение от 0 до 1
        if  $p > 0.5$  then
             $C_a \leftarrow C_{op}$ 
             $W_a \leftarrow W_{op} + 1$ 
        end if
    end if
end procedure

```

Общая схема процедуры голосования выглядит так:

### Алгоритм V(A). Голосование

```

A - множество агентов
 $\alpha$  - агент
 $C_\alpha$  - кандидат, за которого голосует агент  $\alpha$ 
 $W_\alpha$  - вес кандидата
 $L_\alpha$  - список агентов-кандидатов
procedure V(A)
    eof  $\leftarrow \text{false}$  -- Флаг завершения процедуры голосования
    for all  $\alpha \in A$  do -- Инициализация агентов
         $C_\alpha \leftarrow \alpha$ 
         $W_\alpha \leftarrow \dim(L_\alpha)$ 
    end for
    while not eof do -- Основной цикл голосования
        for all  $\alpha \in A$  do -- Цикл по всем агентам
            G1 ( $\alpha$ ) -- или G2 ( $\alpha$ )
        end for
        'Определение условий завершения процедуры голосования eof'
    end while
end procedure

```

Обоснование этих алгоритмов требует ответов на два основных вопроса: (1) сходимость алгоритмов к одному решению и (2) оценка количества шагов голосования.

В работах [Karpov, Karpova, 2015b], [Карпов, Карпова, 2015a] показано, что такая процедура голосования сходится в практически значимом количестве экспериментов с различными топологиями статического роя, т.е. заканчивается выбором единственного агента – лидера. Это справедливо для обоих алгоритмов  $G1$  и  $G2$ .

На Рис. 3.6 показаны три шага процедуры голосования в плотной группе агентов. На первом шаге каждый агент голосует сам за себя, поэтому число ячеек, обозначенных границами распределения голосов за соответствующих кандидатов, равно количеству агентов. Второй шаг (переголосование) показывает интеграцию областей голосования за выбранных кандидатов. Наконец, на шестом шаге все голоса принадлежат одному кандидату и процесс голосования закончен.

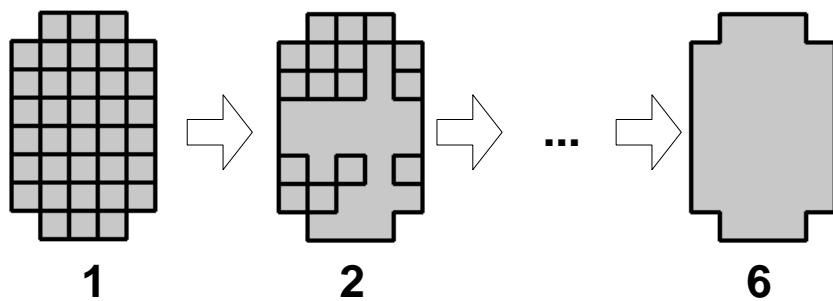


Рис. 3.6. Голосование в плотной группе. Шаги 1, 2 и 6

Пример голосования в предельно неблагоприятных условиях показан на Рис. 3.7. Здесь изображены две ярко выраженные зоны, соединенные перешейками.

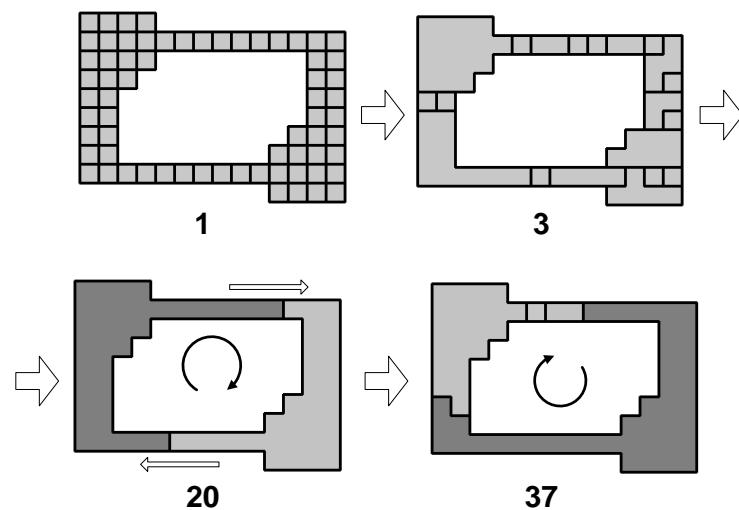
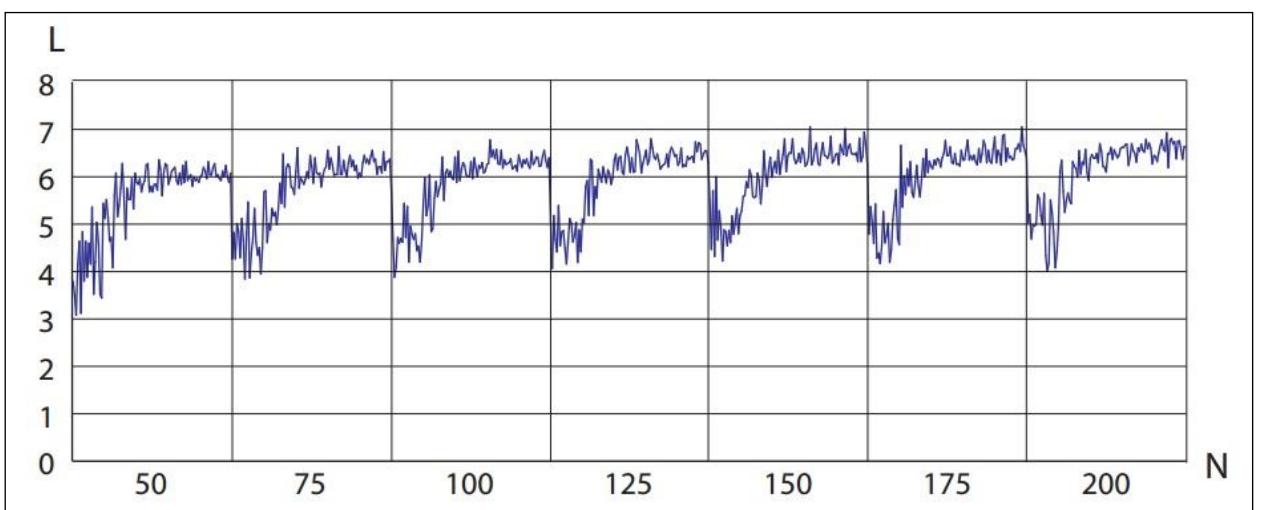


Рис. 3.7. Циклический процесс голосования. Шаги 1, 3, 20 и 37

В этой ситуации наблюдается циклический процесс перераспределения голосов. На 20-м шаге голосования образуются две стабильные зоны, каждая из которых голосует за своего кандидата, и начинается процесс циклического переголосования. Здесь явно видно, как меняются местами предпочтения на 37-м шаге. Этот процесс завершится на 51-м шаге, когда в системе останется один кандидат.

Второй тип серий экспериментов имел сугубо статистическую ориентацию. Генерировались планарные графы из 50–200 агентов. Для каждого значения числа агентов  $N$  ( $N = 50, 75, 100, \dots, 200$ ) проводились 100 экспериментов. Таким образом, общее количество экспериментов равнялось 700. При этом менялось среднее число связей между агентами (количество соседей) – параметр  $L$ . Значение  $L$  менялось от 3 до 7.



*Рис. 3.8. Распределение среднего значения числа связей  $L$  (ось  $Y$ ) в зависимости от числа агентов в группе  $N$  (ось  $X$ )*

На Рис. 3.8 показано распределение значения параметра  $L$  в зависимости от числа агентов  $N$ . Эта диаграмма показывает, что во всех экспериментах использовалось сходное распределение  $L$ . Это означает, что в проводимых экспериментах мы имеем дело со сходными распределениями топологий связей в группах агентов. В этих экспериментах процедура голосования заканчивалась либо после выбора единственного кандидата (нормальное завершение), либо по достижении 500-го шага голосования (неудача). Только 25 из 700 экспериментов (или 3.5%) заканчивались ситуацией, когда после 500 шага в системе осталось два лидера. Результаты экспериментов приведены на Рис. 3.9.

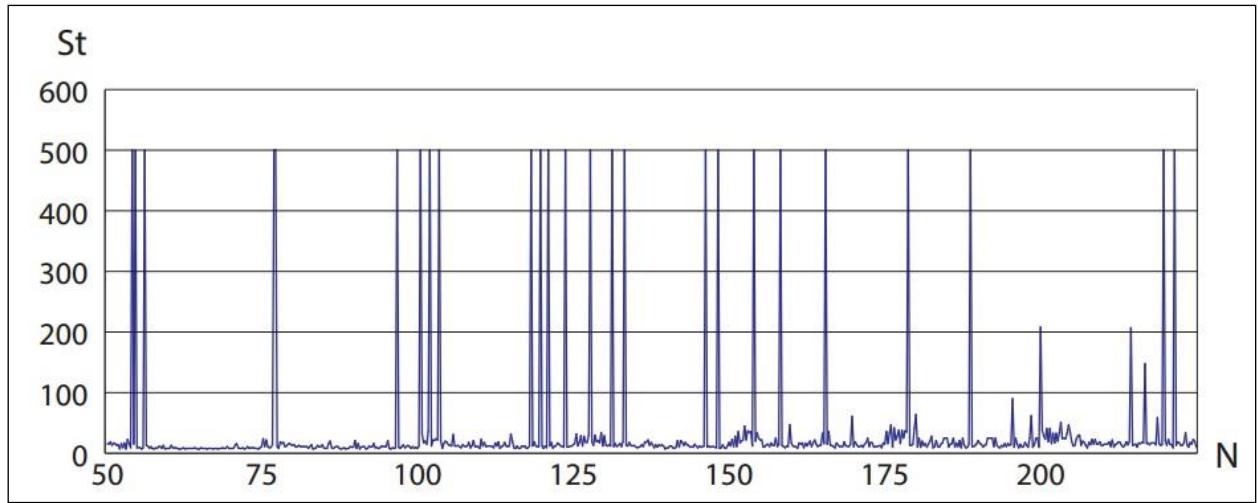


Рис. 3.9. Зависимость числа шагов голосования  $St$  (ось  $Y$ ) от числа агентов  $N$  (ось  $X$ )

Эти результаты показывают, что неудачи процедуры голосования (не выбран единственный кандидат) практически не зависят от числа агентов в группе. С другой стороны, необходимо отметить, что число шагов голосования растет с увеличением количества агентов в группе. Зависимость среднего числа шагов голосования от количества агентов показана на Рис. 3.10.

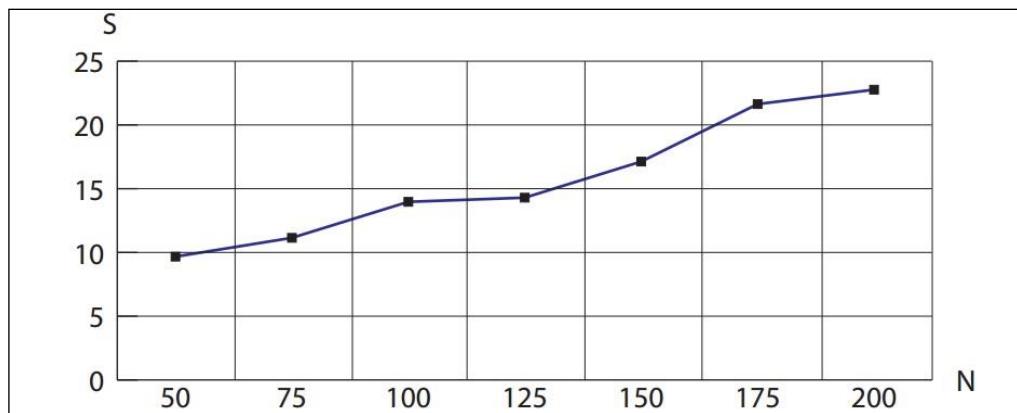


Рис. 3.10. Зависимость среднего числа шагов голосования (ось  $Y$ ) от количества агентов  $N$  (ось  $X$ )

Таким образом, мы можем утверждать, что процедура голосования сходится в статистически значимом количестве экспериментов, и скорость сходимости слабо зависит от количества агентов.

Необходимо подчеркнуть, что в конце процедуры голосования мы имеем только одного лидера. При этом мы не можем предсказать, какой узел станет лидером. Речь идет лишь о том, что мы получаем одно решение из множества возможных вариантов.

**Об условии завершения.** В рассмотренных алгоритмах самой большой проблемой является пункт "Определение условий завершения процедуры голосования *eof*". В

отсутствие глобальной информации о состоянии сети агент должен сам принять решение о завершении голосования. Информации, полученной из ближайшего окружения, для этого явно недостаточно, поэтому возможны два варианта поведения агента:

1. Считать, что голосование должно быть выполнено не более чем за определенное количество шагов, включая верхнюю оценку количества шагов алгоритма голосования.
2. Реализовать некоторую процедуру для обмена сообщениями, определяющими, что голосование завершено, и ни один агент больше не меняет свое решение.

Первый вариант должен доказать сходимость итерационных процедур голосования. Некоторые рассуждения могут быть основаны на аналогии со схемой достижения консенсуса. Де Гроот [DeGroot, 1974] определяет консенсус как взаимное согласие по предмету среди группы людей (агентов в нашей терминологии). Основная сложность заключается в том, что сходимость схемы Де Гроота может быть доказана только для некоторых частных случаев. Другой интерпретацией процесса голосования является известная модель или схема урны Д. Пойи (Polya urn scheme). Определенной проблемой при выборах лидера является возникновение циклов повторного голосования, когда агент  $A$  меняет свое мнение и соглашается с мнением агента  $B$ , а агент  $B$ , в свою очередь, соглашается с  $A$ . Роль одного агента  $A$  или  $B$  может влиять на группу агентов, то есть группу агентов, голосующих за кандидатов  $A$  и  $B$ . Однако суть процесса голосования заключается в том, что изменение мнения агента приводит к увеличению веса оппонента. Мы можем интерпретировать пару агентов с противоположными мнениями как урну Пойи. Количество белых и черных шаров в урне соответствует весу мнения агента. Когда агент соглашается с оппонентом, вес нового мнения возрастает. Это означает, что количество шаров в урне тоже увеличивается. Итак, процесс голосования приравнивается к выбору шара из урны. Схема Пойи сходится, но на практике у нас есть одна проблема. Процедура голосования производит циклические процессы с задержкой по времени. К сожалению, условия сходимости схемы Пойи с задержками не исследованы.

Второй вариант также предполагает наличие некоторого оцененного количества шагов голосования, побуждающих агента отправить запрос, определяющий завершение процедуры голосования. Реализация процедур такого рода также сопряжена с рядом технических трудностей, в частности, с увеличением сетевого трафика, поскольку каждый агент должен реализовывать эту процедуру независимо от других.

## О сходимости процедуры голосования

Речь здесь идет о том, что процесс переголосования должен остановиться, при этом какой именно агент будет выбран лидером – неважно. Приведем обоснования сходимости для некоторых частных случаев.

Для удобства введем понятие фракции  $\pi(X)$ , под которой будем понимать множество непосредственно связанных агентов, голосующих за одного кандидата X.

**Топология "цепь".** Рассмотрим случай, когда у каждого, кроме крайних, членов СР имеется два соседа. Нас интересует процедура разрешения конфликта. Рассмотрим пару соседних конфликтующих фракций агентов. Пусть агенты  $a_n$  и  $a_{n+1}$  голосуют за разных кандидатов A и B с весами  $w_n(A)$ , и  $w_{n+1}(B)$  соответственно,  $A \neq B$ .

При этом будем полагать, что волна распространения голосов идет так, как показано на рисунке ниже.

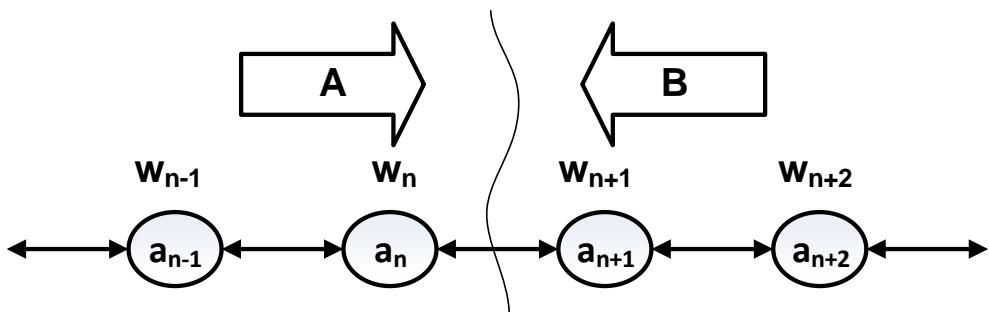


Рис. 3.11. Агенты  $w_n, \dots, w_{n-m}$  образуют фракцию  $\pi(A)$ , агенты  $w_{n+1}, \dots, w_{n+k}$  образуют фракцию  $\pi(B)$

Пусть конфликтующие агенты меняют свое мнение детерминированно, если веса различны, и равновероятно в случае одинаковых весов. При этом если агент меняет свое мнение, то он будет отдавать свой голос за нового лидера, добавляя "1" к весу своего бывшего оппонента и переходя, тем самым, в новую фракцию.

Процедура голосования устроена таким образом, что

$$w_n > w_{n-1} > w_{n-2} > \dots \text{ и } w_{n+1} > w_{n+2} > w_{n+3} > \dots$$

Пусть агент  $a_n$  изменил свое мнение. Тогда вес нового кандидата  $w'_n(B)$  для этого агента будет  $w'_n(B) = w_{n+1}(B) + 1$ . При этом  $w'_n(B)$  будет гарантированно больше веса  $w_{n-1}(A)$ :

$$w_{n-1}(A) = w_n(A) - 1 < w'_n(B)$$

Это значит, что и агент  $a_{n-1}$  изменит свое мнение и проголосует за кандидата A. Далее процесс повторяется и все агенты  $a_{n-1}, a_{n-2}, \dots, a_{n-m}$  проголосуют в итоге за B.

**Время голосования.** Очевидно, что верхняя оценка времени голосования (циклов переголосования) определяется длиной цепи. Т.е. в худшем случае волна переголосования для цепи из  $n$  агентов может пойти от крайнего агента  $a_1$  ( $a_n$ ) к агенту  $a_n$  ( $a_1$ ) и займет  $n$  циклов.

**Топология "кольцо".** Эта ситуация уже не так однозначна. В ней возможны циклические процессы переголосования. Рассмотрим случай с детерминированным определением кандидата, представленный на Рис. 3.12.

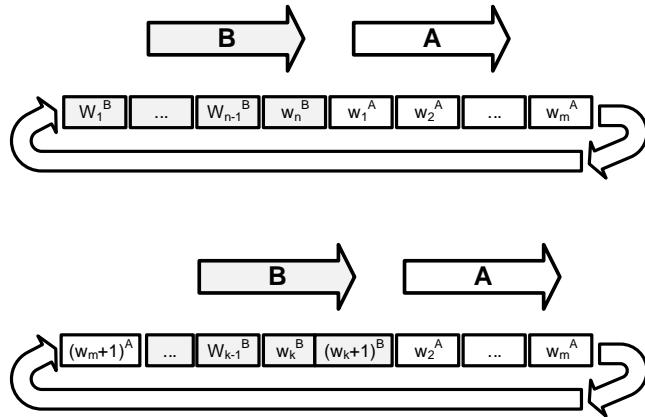


Рис. 3.12. Циклическое смещение границ: а) текущее состояние, б) следующий такт

Здесь  $k$  агентов голосуют за кандидата  $B$  с весами  $w_i^B$ , а  $m$  агентов – за кандидата  $A$  с весами  $w_j^A$ . При показанном на рисунке направлении распространения голосов считаем, что  $w_{i+1}^B > w_i^B$  и  $w_{j+1}^A > w_j^A$ . При этом пусть  $w_n^B > w_1^A$  и  $w_m^A > w_1^B$ , Рис. 3.12,а. Это означает, что граница фракций между агентами  $w_n^B$  и  $w_1^A$  будет смещаться направо. В свою очередь, поскольку  $w_m^A > w_1^B$ , произойдет переголосование слабого агента с весом  $w_1^B$ . Все это приводит к тому, что "головы" фракций будет постоянно смещаться в сторону "хвостов" оппонентов, см. Рис. 3.12,б. Этот процесс становится бесконечным.

**Введение ограничений на вес.** До сих пор предполагалось, что при переголосовании вес нового кандидата будет определяться как максимальный вес соседей плюс 1:  $w_{new}^X = w_{max}^X + 1$ . Именно поэтому вес "головы" фракции  $X$   $w_n^X$  будет больше веса "хвоста"  $w_1^X$ . Исходя из этого, и получается бесконечный цикл. Стоит, однако, ограничить сверху максимально возможный вес, как мы тут же получим сходящийся процесс. Это будет означать, что в итоге  $w_i^X = w_j^X \forall i, j \in \pi(X)$  и мы получаем ситуацию с вероятностным выбором. А это – полная аналогия со схемой случайного блуждания точки на дискретном упорядоченном множестве или отрезке. И тогда мы переходим к рассмотрению вероятностной схемы голосования.

**Вероятностная схема голосования.** Представим схему голосования в виде случайного процесса с конечным множеством состояний  $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_N$ . Каждое состояние  $\xi_i$

– это распределение голосов агентов. Для системы из  $K$  агентов  $N=K^2$ . Если бы в схеме голосования агенты не использовали понятия веса кандидата, то мы имели бы типичную однородную марковскую цепь. Здесь же мы получаем неоднородный дискретный марковский процесс. Изменение весов и приводит к изменению переходной матрицы  $P(t)$  в моменты времени  $t$ . При этом такты смены состояния определяются, по-прежнему, единовременным принятием решений о переголосовании всеми агентами.

Среди состояний  $\xi_i$  имеется ровно  $K$  поглощающих. Это те состояния, в которых все агенты принадлежат одной из  $K$  возможных фракций. В этих состояниях нет конфликта и, следовательно, не происходит переголосований. Существование поглощающих состояний говорит о том, что процесс переголосования (выбора лидера) конечен.

Другим аналогом процесса голосования могут служить сети Хопфилда (спиновые стёкла), в которых итоговая ориентация элементов сети определяется ориентацией их соседей.

Для итоговой проверки были проведены серии вычислительных экспериментов по исследованию временных характеристик предложенных методов. При этом использовался предельно неблагоприятный режим работы, когда в синхронном режиме все агенты одновременно принимают решение о переголосовании. К тому же использовались предельные топологии – кольцо, прямоугольник и полносвязный граф. Сравнивались варианты, в которых использовался и не использовался параметр "вес кандидата". Некоторые результаты приведены на Рис. 3.13.

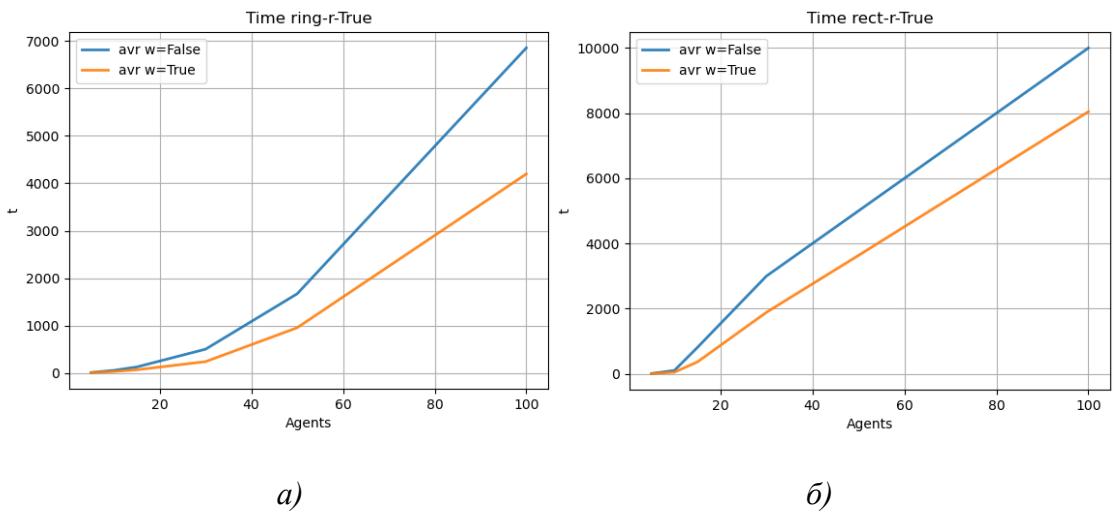
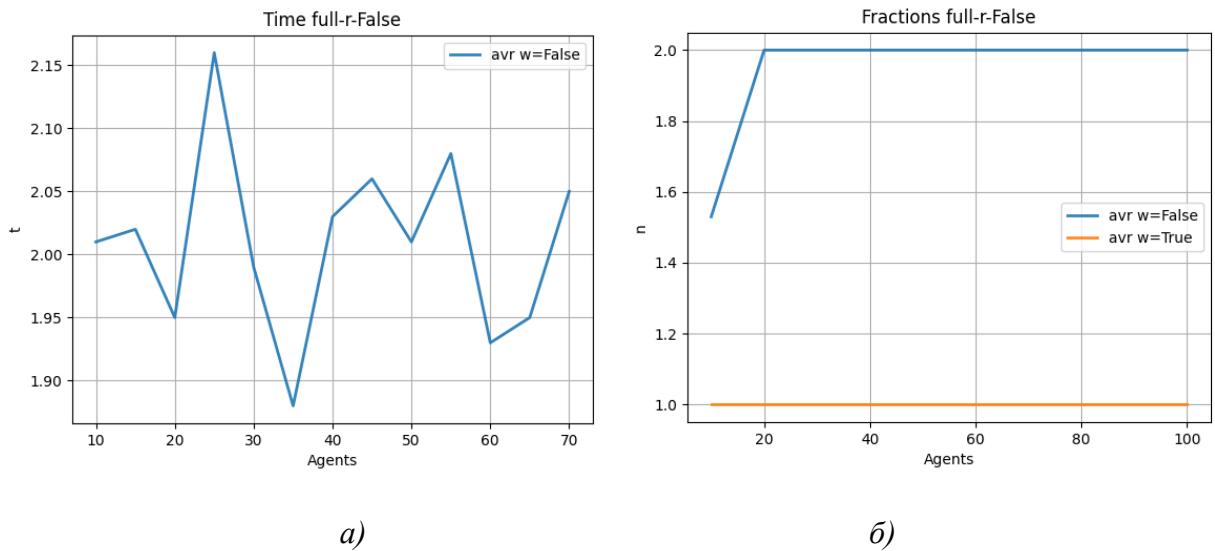


Рис. 3.13. Зависимость среднего времени переголосования от количества агентов: а) топология "кольцо", б) топология "прямоугольник"  
синий график – режим без использования веса кандидата, красный – с использованием веса

Как видно, введение веса кандидата приводит к значительному уменьшению времени голосования: для топологии "кольцо" – больше чем на 40%, для топологии прямоугольник – почти на 20%.

Повторим, что для асинхронного режима работы скорость сходимости крайне высока. Даже в полносвязной топологии агенты могут осуществить итоговый выбор за 1-3 такта. Причем время голосования слабо зависит от количества агентов. Эта ситуация проиллюстрирована на Рис. 3.14.



*Рис. 3.14. Асинхронный режим детерминированного голосования в полносвязной системе агентов: а) время слабо зависит от количества агентов, б) зависимость среднего количества фракций от количества агентов для случая использования веса (красный график, "avr w=True") и для случая отсутствия такового (синий график, "avr w=False")*

### Общая схема оценка времени голосования

Приведенные выше оценки, основанные на представлении процесса голосования, как марковского, дают излишне пессимистические результаты, хотя обосновывают конечность процедуры. Поэтому предлагается еще одна схема, более полезная практически. Пусть по-прежнему имеется  $K$  агентов. Будем полагать, что для текущей топологии сети каждый агент имеет в среднем  $\rho$  соседей. В начальный момент времени число фракций  $N_\pi(0)$  равно  $K$ : каждый агент голосует за себя. Назовем эпохой  $\varepsilon$  интервал времени, в течение которого существует фиксированное распределение агентов по фракциям.

Определим количество эпох, требуемых для того, чтобы все агенты стали принадлежать одной фракции, т.е. голосовали бы за одного кандидата. Количество фракций в эпоху  $i$  определяется как

$$N_\pi(i) = N_\pi(i-1)/\rho$$

Это связано с правилами голосования: группа соседних агентов обязательно приходит к консенсусу, при этом количество агентов, согласующих свои мнения, определяется числом их соседей. Таким образом, число эпох  $Z$  находится из условия существования одной фракции

$$N_\pi(Z) = K/\rho^Z = 1, \text{ откуда } Z = [\log_\rho K].$$

Оценим продолжительность эпох  $\varepsilon_i$ ,  $i=1..Z$ . Длительность эпохи определяется тем, сколько времени потребуется для того, чтобы члены фракции поменяли свое мнение. В худшем случае фракции из  $n$  агентов для этого потребуется  $n$  тактов времени. Для эпохи  $i$  средняя численность фракции определяется как  $K/N_\pi(i)$ , следовательно, длительность эпохи  $i$  есть

$$\varepsilon_i = K/N_\pi(i) = \rho^i$$

Таким образом, получаем итоговую оценку количества тактов, за которое все агенты проголосуют за одного кандидата:

$$T(\rho, K) = \sum_{i=0}^Z \varepsilon_i = \sum_{i=0}^Z \rho^i, Z = [\log_\rho K] \quad (3.3)$$

Это выражение показывает, что время голосования слабо зависит от числа агентов, а определяется больше количеством связей между ними, т.е. топологией.

Итак, была рассмотрена задача выбора лидера – базовый элемент процесса организации в группе агентов. Характерно, что рассматривался самый тяжелый случай – однородная группа агентов с минимальным репертуаром сообщений. При этом важно, что механизм выбора основан исключительно на локальном взаимодействии аниматоров и достаточно естественен с точки зрения биоподобия и общих принципов определения доминанта.

**Примечание.** Описанный механизм определения лидера основан на процедуре выделения доминанта и был представлен в готовом, феноменологическом виде, как отдельный компонент системы. При этом открытый остается вопрос, является ли этот механизм базовым, т.е. реализуемый на нижнем уровне управления, или же это – композиция других механизмов, таких, как подражательное поведение, сопоставление конспецифика с Я, сигнальная коммуникация и т.п.

### 3.4. Дифференциация функций

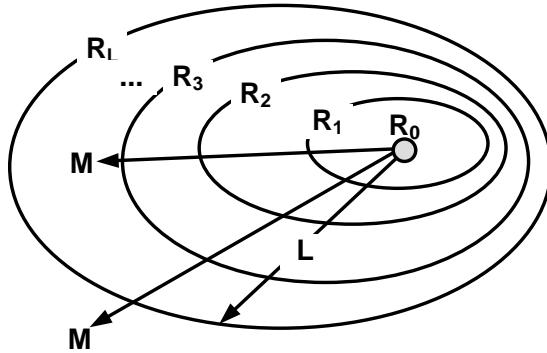
Специализация (разделение функций или феномен ролей) в роевой робототехнике обычно сводится к так называемому распределению задач между агентами. Это одно из наиболее проблемных мест роевой робототехники. В упомянутых обзорах [Zhiguo и др., 2012] и [Yogeswaran, Ponnambalam, 2010] распределение задач в коллективе роботов рассматривается лишь декларативно. Конструктивные схемы процесса распределения задач встречаются реже, такие, например, как приведенная в работе [Михайлов, Назарова, Ющенко, 2016] децентрализованная процедура распределения задач в группе роботов. В ее основе которой лежит процесс переговоров агентов – аукцион, на котором роботы-агенты предлагают свои "цены" (затраты) на выполнение той или иной задачи. Здесь важно, что обязательным условием проведения этих переговоров является предварительное разбиение роботов на подгруппы, внутри которых выбираются лидеры – инициаторы торгов. Само же лидерство определяется количеством связей между соседями. Чаще же всего описываются некоторые физические модели, методы распределенного планирования, оптимизации и прочие общие механизмы (см, например, [Каляев, Гайдук, Капустян, 2009]). Причиной этому является тот факт, 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. Рассмотрим метод распределения ролей (задач), основанный на известной процедуре распространения волны управления [Kagrov, Kagrova, 2015b], [Kagrov, Kagrova, 2015a]. Важно, что инициатором распространения является лидер.

Обозначим его роль, как  $R_0$ . Непосредственные соседи лидера ("ближний круг") получают от него инициирующий пакет, согласно которому им назначается роль  $R_1$ , и т.д. (Рис. 3.15). 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. Проблемы соотношения между количеством агентов  $L$  и требуемым количеством ролей  $M$  могут разрешаться разными способами. Например, путем назначения агентам нескольких ролей, если  $M > L$  (в противном случае, если  $M < L$ , некоторые агенты останутся "безработными").



*Рис. 3.15. Имеющееся ( $L$ ) и требуемое ( $M$ ) количество ролей*

В качестве примера в работе [Karpov, Karpova, 2015a] описана процедура распределения ролей для решения задачи стайной охоты. В ней лидер стаи назначает роли загонщикам для совершения маневра окружения жертвы.

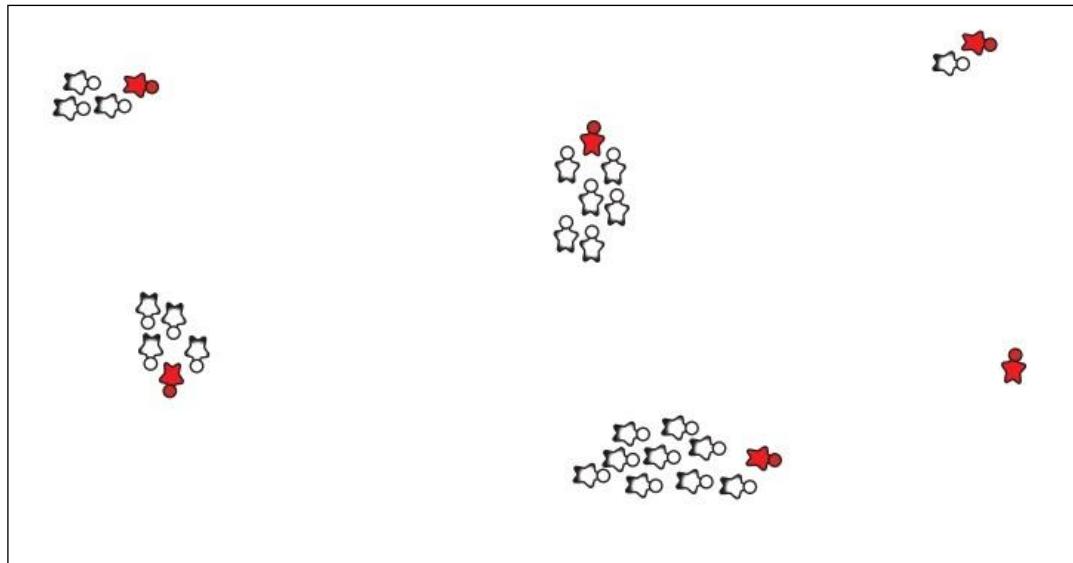
Схема стайной охоты приведена ниже. Она состоит из двух частей: поиска жертвы и собственно процедуры охоты.

#### (1) Поиск жертвы:

1. Формирование стаи. Охотники следуют за текущим (локальным) лидером, Рис. 3.16.
2. Если некоторый агент обнаруживает жертву, то запускается процедура охоты.

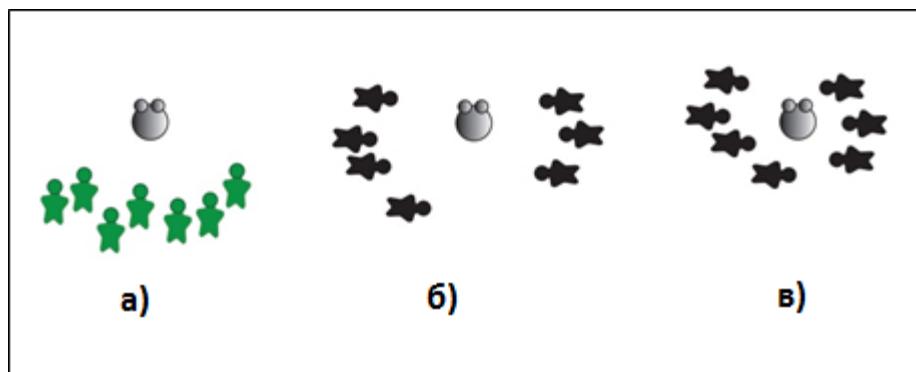
#### (2) Процедура охоты:

1. Выбор нового лидера. Начальные веса кандидата не зависят ни от идентификаторов агентов ( $ID$ ), ни от количества соседей. Начальные веса определяются только близостью к жертве.
2. Распределение ролей. В этой задаче хищники могут выступать в двух ролях: быть левым или правым загонщиком. Основная задача – окружить жертву с двух сторон и не дать ей убежать.



*Рис. 3.16. Множество стай. Локальные лидеры выделены красным. Остальные (белые) хищники следуют за лидерами*

На Рис. 3.17 показан пример трех этапов процедуры стайной охоты.



*Рис. 3.17. Фазы стайной охоты: а) охотники обнаружили жертву; б) роли распределены ("загонники слева" и "загонники справа"), хищники преследуют жертву; в) хищники атакуют жертву*

Оценивались две стратегии охоты: индивидуальная и стайная. На Рис. 3.18 показаны усредненные результаты по 50 экспериментам.

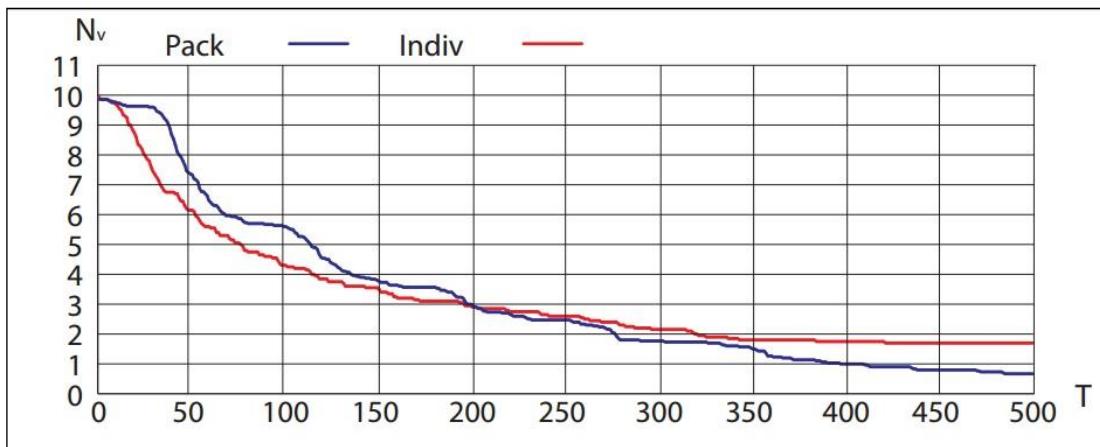


Рис. 3.18. Зависимость количества пойманных жертв от времени. ‘Pack’ – характеристика стайной стратегии охоты, ‘Indiv’ – характеристика индивидуальной охоты

Из экспериментов видно, что с течением времени эффективность коллективной охоты уменьшается по сравнению с индивидуальной. Это связано с естественной убылью кормовой базы: более выгодным становится индивидуальный поиск, равномерно охватывающий широкую территорию. Более подробно эта процедура описана в [Karpov, Karpova, 2015a].

### Синергетические эффекты и дифференциация

Имеется ряд соображения более общего характера, касающихся важности рассмотренных механизмов дифференциации в группе агентов.

Уже говорилось о том, что отсутствие ожидаемых синергетических эффектов связано не только и не столько с техническими проблемами групповой робототехники. Большинство исследований в области групповой робототехники сосредоточено на т.н. системах роевой робототехники, особенностью которой является использование больших однородных совокупностей простых устройств. Вместе с тем появление синергетических эффектов возможно лишь в неоднородных системах. Без специализации, без функциональной дифференциации могут быть получены лишь аддитивные эффекты.

Специализация может быть неявной, как, например, в гомогенных системах Лаборатории интеллектуальных систем Лозаннской политехнической школы (Laboratory of Intelligent Systems EFPL), описанных в [Mondada и др., 2005], где группы одинаковых роботов выполняют разнообразные задачи, связанные с перемещением в сложных средах. Реже описываются гетерогенные группировки роботов, как, например, проект Swarmanoid [Dorigo, 2011]. В них решаются комплексные задачи, требующие наличия летающих, транспортных и манипуляционных роботов (т.н. "eye-bots", "hand-bots" и "foot-bots").

Важно, что рассмотренные выше механизмы образования неоднородностей в группе (выбор лидера, распределение задач) имеют достаточно общий характер и легко имплементируются в системы с уже имеющейся неоднородностью на аппаратном уровне.

Распределение задач подразумевает, что между агентами существует информационный обмен, взаимодействие на сигнальном уровне и даже языковое общение. Рассмотрим этот вопрос более детально.

### **3.5. Язык и общение**

Исследования в области языкового взаимодействия в робототехнике можно условно разделить на два основных направления: (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 [Christensen, O'Grady, Dorigo, 2008] представлен язык SWARMORPH-script, который позволяет описывать правила, управляющие процессом создания распределенной формы (морфологии) группы роботов. При этом на базе локальной коммуникации между роботами происходит обмен фразами, содержащими идентификаторы требуемых правил движения. Иной подход предложен в [Павловский, Кирков, 2013], где рассматривается задача коммуникации роботов на основе языка мультичастотных акустических сигналов.

Так или иначе, но в основном речь идет о создании некоторого командного интерфейса, где отправителем команды может являться не только оператор, а другой робот. При этом обсуждаются, главным образом, задачи создания форматов сообщений и организации коммуникационных каналов. В данной работе предлагается иной взгляд на проблему организации языкового общения между роботами. А именно, рассмотрение системы управления (СУ) робота как знаковой системы [Карпов, 2015a], [Карпов, 2015b]. Более строго, нас интересуют свойства архитектуры СУ агента (анимата), способного к такому общению.

**Интерпретация знака.** Будем полагать, что система управления роботом (агентом) построена на основе семиотической (знаковой) сети. При этом на функциональном уровне знаковая сеть представлена в виде абстрактной нейроподобной системы. Рассматривая знак как классическую триаду "имя (символ) – денотат (означаемое) – сигнификат (смысл)" (см., например, [Поспелов, Осипов, 1999], [Степанов, 1971] или в терминах

"понятие", "имя знака", "представление" согласно [Осипов и др., 2018]), и соотнося его с нейроподобной структурой СУ, естественным образом формируется механизм языкового восприятия.

*Имя* знака интерпретируется как элемент фразы входного языка (то, что воспринимает знаковая система; или – система понятий, которой оперирует знаковая СУ). *Десигнатом* (именующее, идеализированное выражение для денотатов или концепт денотата) знака является непосредственно возбуждаемая вершина или множество вершин сети знаков, 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. 3.19 представлено схематическое изображение знака (треугольник Фреге) и соответствующего фрагмента сети системы управления.

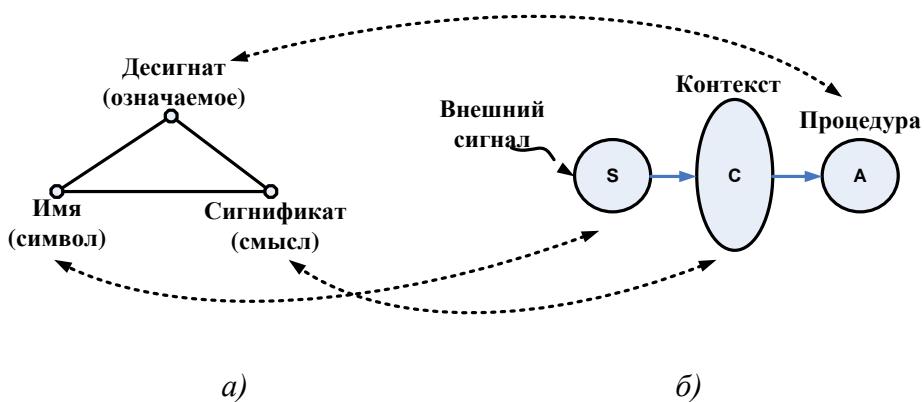


Рис. 3.19. а) знак; б) фрагмент сети

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 низшей семиотической системы: разумеется, мы не рассматриваем знак как элемент ментального мира в смысле отражения некоторого реального объекта в сознании субъекта.

**Примечание.** Здесь и далее мы используем термины "знак", "семиотика" и "семиотические модели" с крайней осторожностью. С одной стороны, семиотическая модель – это весьма строгое формальное понятие, см., например, работы школы Г.С. Осипова [Осипов, 2002], [Осипов, 2015], [Осипов и др., 2018]. С другой стороны,

на базе семиотических моделей строятся прикладные системы: от высокоуровневого управления поведением [Осипов, Панов, Чудова, 2014] до систем управления техническими объектами [Макаров, Панов, Яковлев, 2016]. Здесь же мы говорим о том, что те или иные процессы и явления, наблюдаемые в архитектуре анимата, могут интерпретироваться с точки зрения семиотического, знакового подхода.

**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. При этом далее полагается, что понятие *фраза* (фраза может состоять только из одного слова) используется для описания процессов внутри знаковой системы, а понятие *сигнал* отражает внешнюю, коммуникационную сторону описываемых процессов общения.

**Восприятие языка.** Предполагается, что множество входных символов непосредственно возбуждает именуемые ими вершины знаковой 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 воспринимается единственным элементом сети – соответствующей вершиной-шлюзом "Опасность", Рис. 3.20.

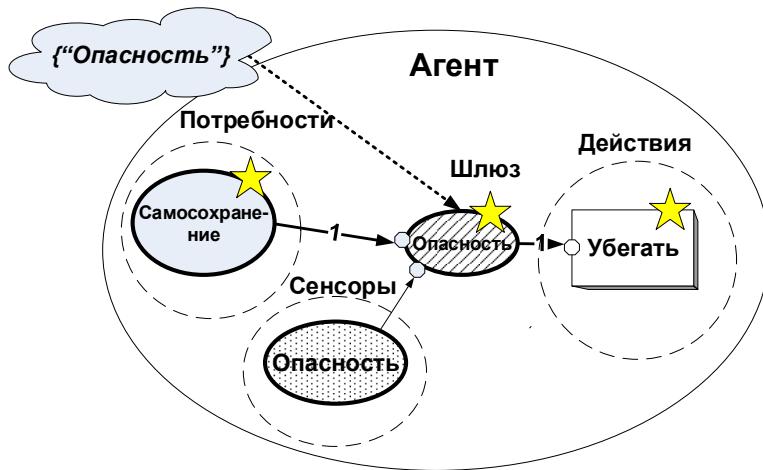


Рис. 3.20. Восприятие символа агентом

Возбуждение шлюза приводит к активизации действия "Убегать". При этом для системы, вообще говоря, важно лишь появление возбужденной вершины, а что привело 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 агента. Иными словами, на базовом уровне СУ

сообщает другим агентам об имеющихся потребностях, генерируя фразы в виде множества символов, как имен соответствующих вершин-десигнаторов. При этом важно, что языковая инициация, определяемая актуальными потребностями агента (робота), непосредственно связана с реализацией *эмоционального компонента системы управления*. На Рис. 3.21 приведен тот же фрагмент СУ. В силу имеющихся потребностей и сигнала от сенсора, шлюз "Опасность" находится в возбужденном состоянии и является генератором символа "Опасность".

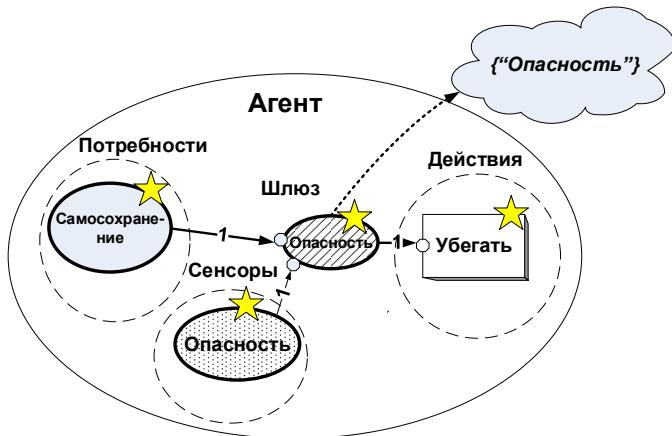


Рис. 3.21. Генерация символа

Описанный механизм позволяет, в частности, реализовать такой феномен как контагиозное (заразное) поведение.

### 3.6. Контагиозное поведение

Напомним, что примером контагиозного поведения является действие сигнала тревоги, заставляющего всю группу обратиться в бегство. Более того, иногда контагиозное поведение рассматривается как пример более общего феномена подражательного поведения (впрочем, это утверждение довольно спорное).

Будем считать, что выходной символ порождается шлюзом, у которого значение частной эмоции (выражение (2.5)) 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" [Панов, 1983], [Панов, 2012].

Пусть в знаковой 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 убегать – 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. Эта ситуация отображена на Рис. 3.22.

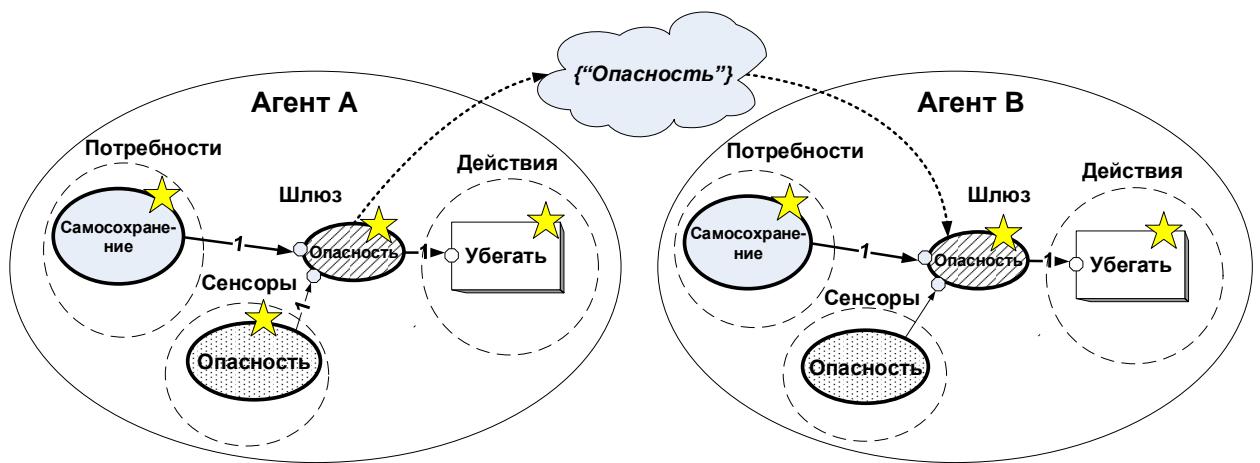


Рис. 3.22. Генерация и восприятие фразы

Здесь агент-инициатор **A** формирует фразу {"Опасность"}. Фраза воспринимается агентом-реципиентом **B**, при этом у реципиента **B** шлюз "Опасность" возбуждается даже при отсутствии подтверждающего сигнала от соответствующего сенсора. Далее реципиент **B** выполняет действие "Убегать". Здесь важно еще раз отметить, что робот начинает "говорить" (генерировать фразы) лишь тогда, когда он испытывает наибольшие отрицательные эмоции.

Как видно, при такой языковой организации контагиозное поведение формируется самым естественным образом. Формально это означает следующее. Согласно (2.11), активизация процедуры  $f$  зависит от значений сигналов шлюзовых элементов  $G$ , а значение  $G$  зависит от сигналов сенсоров (и, косвенно, от актуальных потребностей), см. (2.7). В нашем же случае мы говорим об активизации  $G$  от внешнего сигнала-фразы  $Signal$ , и (2.7) расширяется до

$$G=G(E, S, Signal) \quad (3.4)$$

Подчеркнем, что рассмотрение эмоционально-потребностной архитектуры СУ как знаковой системы, позволяет говорить о ней как о более общей поведенческой модели, нежели распространенные автоматные стимул-реактивные модели, хотя с технической точки зрения рефлекторный уровень управления удобнее описывать на автоматном или продукционном языке. Суть знаковой системы раскрывается при описании высокоуровневых феноменов поведения.

### **Комментарии к знак-ориентированной модели**

Знак-ориентированные или семиотические модели сами по себе изначально были ориентированы на решение задач управления, в том числе – на управление техническими системами, см., например, классические работы [Поспелов, 1988], [Поспелов, Осипов, 1999] или [Головина, 2001]. Естественным развитием прикладной семиотики стало применение знаковых моделей в робототехнических системах. Однако в области робототехники речь в основном идет о семиотике как о форме представления знаний ([Sequeira, Ribeiro, 2006], [Bento, Prates, Chaimowicz, 2011] и др.). В настоящем же исследовании знак-ориентированная система рассматривается не с точки зрения инженерии знаний. Напротив, представленная в работе эмоционально-потребностная архитектура системы управления рассматривается с позиций семиотики. В такой архитектуре связки вида "потребность-сенсорика-действие" рассматриваются как знаки, со всей знаковой атрибутикой. Такая интерпретация позволяет естественным образом реализовать множество различных феноменов как социального, так и индивидуального поведения и взаимодействия. Это и вопросы подражательного поведения, и элементы языкового общения, и понимание сути механизмов формирования модели мира, образования субъективного Я и т.д.

**Примечание.** Приведенная схема контагиозного поведения на самом деле основана на том, что в этологии называется *сигнальной коммуникацией*. Некоторые этологи вообще не склонны рассматривать пресловутый "язык животных" как существующее явление (если понимать под языком отражение картины мира и использовать понятия знака-символа), см., например, работы Е.Н. Панова [Панов, 2014]. В данном случае сигнальная коммуникация действительно является лишь внешним проявлением состояния индивида. Кроме того, как будет разъяснено далее, считать контагиозное поведение разновидностью подражательного вряд ли представляется целесообразным.

Перейдем к рассмотрению более сложного по сравнению с контагиозным поведением механизма – подражанию.

### **3.7. Сенсорная модель подражательного поведения**

Одним из важнейших компонентов, фигурирующим во многих механизмах социального поведения, является подражательное поведение. Именно феномен подражательного поведения ответственен за т.н. систему социальных адаптаций. Эта система включает в себя врожденный стереотип поведения, выражающийся в непрерывной ориентации на соседних особей, а также ярко выраженные подражательные реакции [Сотская, 2003]. Подражательное поведение служит для поддержания стада или стаи как устойчивого целого и обеспечения определенной *синхронизации* деятельности особей. То же самое касается реализации процедур обучения и, в какой-то мере, симпатической индукции (контагиозного поведения).

Подражательное поведение – это один из наиболее сложных для технической реализации механизмов. Основная проблема заключается в том, что система должна понимать, чему, собственно, следует подражать. Т.е. уметь выделять некий комплекс действий, совершаемых объектом для подражания, рассматривать этот процесс во времени и т.д. Частично эти проблемы созвучны тем, что имеются в процедуре обучения как такового. Например, даже в механизме простейшего стимул-реактивного поведения сакраментальным является вопрос о том, за что именно, т.е. за какое действие или поведение система получила сигнал поощрения или наказания.

В работе [Breazeal, Scassellati, 2002] ставятся следующие вопросы, касающиеся реализации подражательного поведения: (1) когда подражать? (2) чему подражать? (3) как отобразить наблюдаемые действия в поведенческие ответы? И (4): как работу оценить свои действия, скорректировать ошибки, и определить, когда он достиг своей цели?

Ниже будет рассмотрен один из возможных механизмов реализации подражательного поведения, построенный на основе наблюдений и сопоставления наблюдаемых признаков с некоторой моделью [Карпов, 2016б].

#### **3.7.1. Языковые схемы подражательного поведения**

Уже говорилось, что основная проблема при реализации подражательного поведения – это понять, чему надо подражать. Фактически, это означает необходимость определения состояния объекта подражания и последующий переход субъекта в такое же состояние. Очень часто решение этой задачи основано на реализации некоторой системы коммуникаций между агентами. Например, используется следующий сугубо технический трюк: каждое действие или выполнение некоторой фиксированной поведенческой процедуры сопровождается выдачей (генерацией) некоторого символа или фразы. Иными

словами, робот постоянно оповещает свое окружение о том, что он сейчас делает или в каком состоянии находится. Это – коммуникационный уровень общения.

Выше мы уже рассматривали реализацию схемы языкового (точнее – сигнального) взаимодействия между роботами, основанную на знак-ориентированной системе управления роботом (агентом). Эта схема позволяет реализовывать, в частности, феномен контагиозного поведения (примером которого является действие сигнала тревоги, заставляющего всю группу обратиться в бегство), [Карпов, 2015b]. Следует еще раз отметить, что контагиозное поведение рассматривалось как пример более общего феномена подражательного поведения. Однако здесь нас интересует подражательное поведение, основанное исключительно на сенсорном восприятии.

### 3.7.2. Сенсорная модель

Далее мы рассмотрим модель подражательного поведения, в которой не используются коммуникационные каналы, а реализуется схема непосредственного наблюдения, которую назовем сенсорной моделью.

**Схема поведения.** По-прежнему будем считать, что поведение агента (робота) описывается множеством простых продукций вида

$$C_1 \ \& \ C_2 \ \& \ \dots \rightarrow A$$

Подробности устройства таких правил не существенны. Это могут быть нечеткие правила, могут быть варианты правил с использованием коэффициентов уверенности и пр. Важно, что имеется множество условий  $C_i$  и некоторое заключение  $A$ . Конъюнкт  $C_i$  может рассматриваться как некий наблюдаемый сенсорами робота объект. Причем в простейшем случае можно полагать, что чем ближе этот объект, тем выше уровень соответствующего сигнала  $C_i$ . В свою очередь заключение  $A$  может интерпретироваться как сигнал, запускающий некоторую поведенческую реакцию или процедуру – некий аналог командного нейрона.

В качестве примера рассмотрим простую поведенческую схему, которая определяет проявление агентом агрессии, направленной на некоторый объект  $O$ .

Правило агрессии (атаки) выглядит так:

$$O \ \& \ C_A \rightarrow A \tag{3.5}$$

Здесь  $O$  – наблюдаемый сенсорной системой агента объект, а  $C_A$  – некий контекст, мотивация агрессивного поведения агента. Условно эта схема изображена на Рис. 3.23.

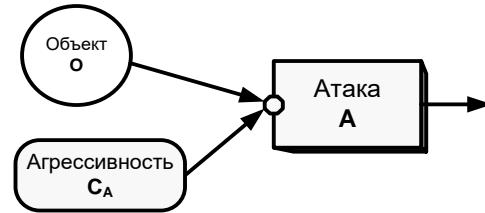


Рис. 3.23. Правило атаки

Выражение (3.5) определяет индивидуальное поведение, и подражательный аспект в нем отсутствует. Рассмотрим далее некоторое общее правило поведения субъекта  $S$ , трактуемое следующим образом: если субъект  $S$  наблюдает объект  $O$  и при этом объект находится рядом с субъектом, то  $S$  атакует  $O$ . Здесь также присутствует некий контекст агрессивности  $C_S$  субъекта. Формально это можно записать так:

$$O \& S \& R(S, O) \& C_S \rightarrow A_S \quad (3.6)$$

Здесь  $A_S$  – действие,  $R(S, O)$  – некоторая функция, определяющая близость между субъектом и объектом. На Рис. 3.24 изображена схема соответствующего поведения.

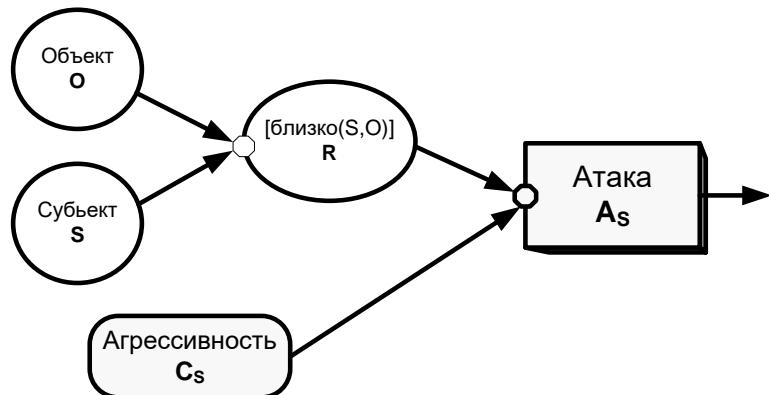


Рис. 3.24. Общее правило поведения субъекта. Условие атаки – наличие определенного уровня агрессивности и близость объекта атаки

Структура, представленная на Рис. 3.24, определяет возможную схему наблюдения. Действительно, если сенсорная система агента-наблюдателя может зарегистрировать объект  $O$  и субъекта  $S$ , то этот агент может определить близость наблюдаемых  $O$  и  $S$  и сделать вывод о том, что  $S$  атакует  $O$ .

### 3.7.3. Подражательное поведение

Возникает вопрос: насколько общее правило поведения (3.5) применимо к нашей основной задаче реализации подражательного поведения? Непосредственное отождествление субъекта  $S$  и некоторого субъективного  $\mathcal{Y}$  не приведет к конструктивным результатам, несмотря на кажущуюся естественность этого шага. Здесь под  $S.\mathcal{Y}$  будем

понимать некоторый комплекс параметров, характеризующий состояние агента, включая его координаты, направление, скорость и т.п. Это несколько отличается от понятия *С.Я.*, представленного, например, в [Карпов, 2012] и в Главе 2 этой диссертации.

Рассмотрим следующую задачу. Пусть агент наблюдает некую удаленную пару – объект  $O$  и субъект  $S$ . Отождествление субъективного *Я* и  $S$  формально может рассматриваться как замена  $R(S, O)$  на  $R(\text{self}, O)$ . Однако становится непонятно, на кого должна быть направлена процедура нападения. Объект  $O$  может и не находиться рядом с агентом-наблюдателем. Было бы логично, если бы агрессия агента была направлена не на удаленный объект  $O$ , а на тот объект, который обнаружен рядом. Этого можно добиться, если результат наблюдения (наблюданная сцена) будет оказывать влияние на поведенческую мотивацию агента – его контекст  $C_A$ .

Если принять, что результатом подражания должна быть тождественность поведения, то, исходя из (3.5) и (3.6), мы получим следующую цепочку правдоподобных рассуждений.

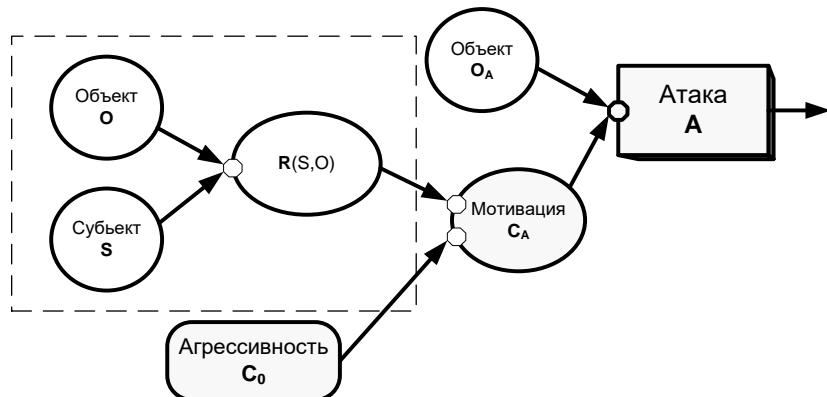
Пусть  $A = A_S$ . Тогда

$$O \& C_A = O \& S \& R(S, O) \& C_S$$

Откуда получаем основное соотношение:

$$C_A = S \& R(S, O) \& C_S \quad (3.7)$$

Иными словами, наблюдаемая близость стороннего субъекта  $S$  и объекта  $O$  воздействует на контекст наблюдателя (мотивацию агрессивности в нашем примере). При этом важно, что действие агента будет направлено именно на наблюдаемый им – агентом – объект. Итоговая схема представлена на Рис. 3.25.



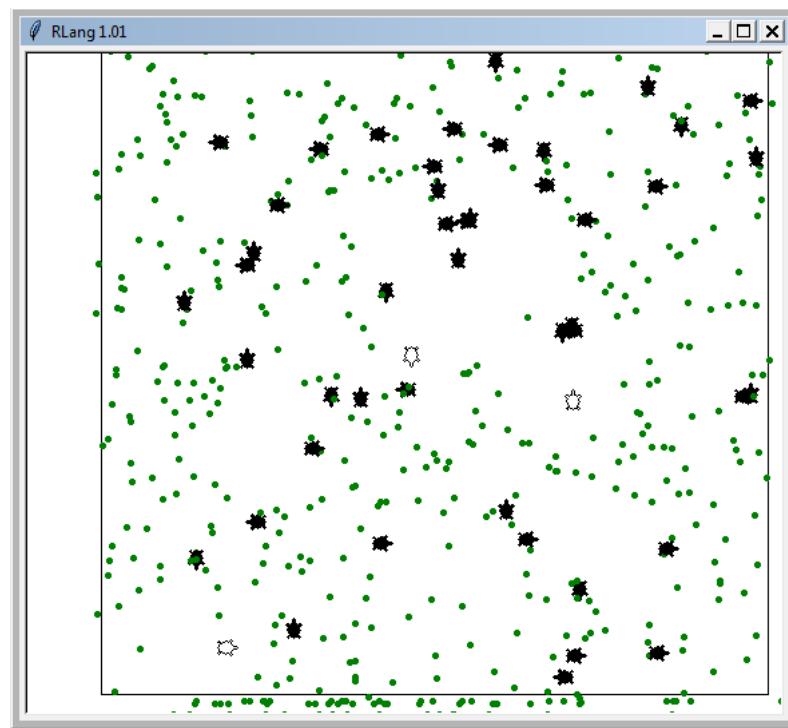
*Рис. 3.25. Схема подражательного поведения на примере проявления агрессивности*

Итак, особенность схемы заключается в том, что агент не видит непосредственно действия другого субъекта, данном случае – атаку. Агент наблюдает, что кто-то (субъект) взаимодействует с объектом. Именно это наблюдаемое взаимодействие (близость

субъекта и объекта) расценивается как атака в силу имеющейся у агента модели такого поведения. Иными словами, агент сопоставляет наблюдаемую сцену с некоторой схемой.

## Эксперименты

В качестве иллюстративного примера была рассмотрена следующая типичная задача. На тороидальной клеточной поверхности, на которой обитают агенты, размещалось некоторое количество “корма”. Агенты оснащены датчиками, регистрирующими в некоторой окрестности кормовые участки и способными обнаружить своих “собратьев”. Кроме того, агенты обладают способностью генерировать некий сигнал, также воспринимаемый другими агентами. При этом агент способен определить направление на источник сигнала. Задача заключается в том, чтобы, используя локальные правила поведения, как можно более эффективно собрать корм. На Рис. 3.26 приведен пример такого поля.



*Рис. 3.26. Игровое поле*

Были проведены серии экспериментов, в которых сравнивалась эффективность модели подражательного поведения с тестовой – той, в которой агенты при поиске корма использовали только случайное блуждание. Подражательность реализовывалась следующим образом: когда агент находил кормовой участок, он генерировал некое сообщение (сигнал), которое заставляло прочих агентов направляться к источнику сигнала. Эта упрощенная схема, в отличие от рассуждений, приведенных выше,

необходима была исключительно с точки зрения получения сугубо статистических результатов.

На Рис. 3.27 приведены усредненные графики зависимости количества съеденного корма от времени. Серия  $R1$  – это популяция, в которой реализован механизм подражательного поведения,  $R0$  – поведение без подражания.

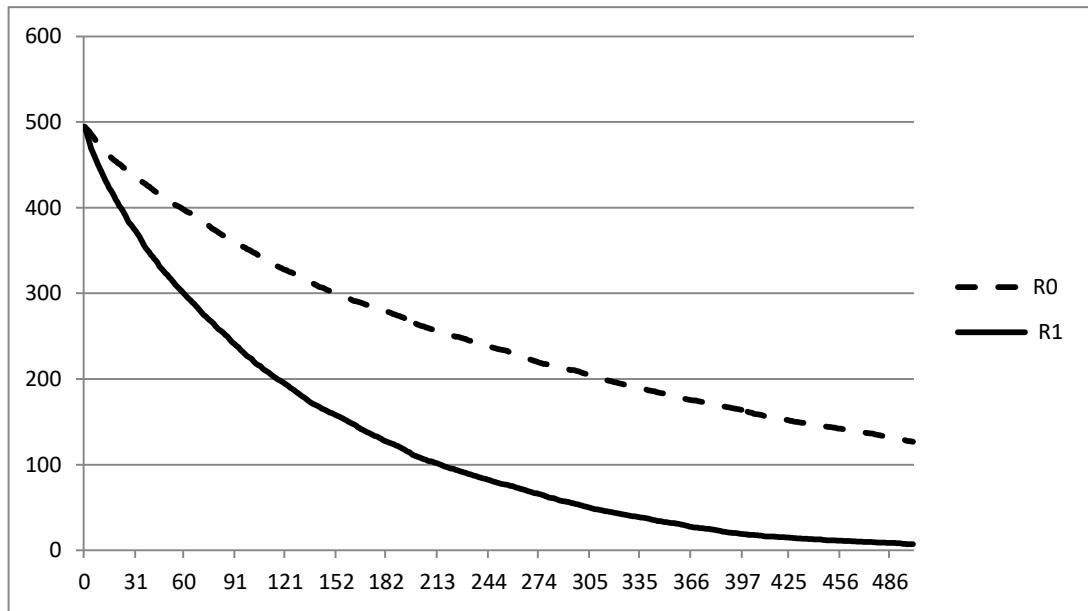


Рис. 3.27. Зависимость количества съеденного корма от времени. На графике – количество оставшегося корма (в условных единицах)

Из Рис. 3.27 видно, что эффективность схемы подражательного поведения значительно выше той, в которой агенты игнорируют состояние и поведение других членов группы.

На самом же деле эти эксперименты не доказывают ровным счетом ничего. Варьирование параметров среды или агентов для рассмотренной задачи может привести к результатам, когда обе схемы дадут и практически одинаковые результаты, и те, в которых подражательность ухудшает эффективность поиска. Причина заключается в том, что подражание – это механизм, присущий высокоорганизованному поведению, и его преимущества могут проявляться лишь при решении достаточно специфических, сложных задач. Рассмотренная же выше задача является сугубо модельной, иллюстративной лишь со статистической точки зрения. По сути, такие задачи сводятся лишь к тому, что у агентов увеличивается радиус окрестности обнаружения цели.

Более интересной выглядит схема поведения, представленная на Рис. 3.28.

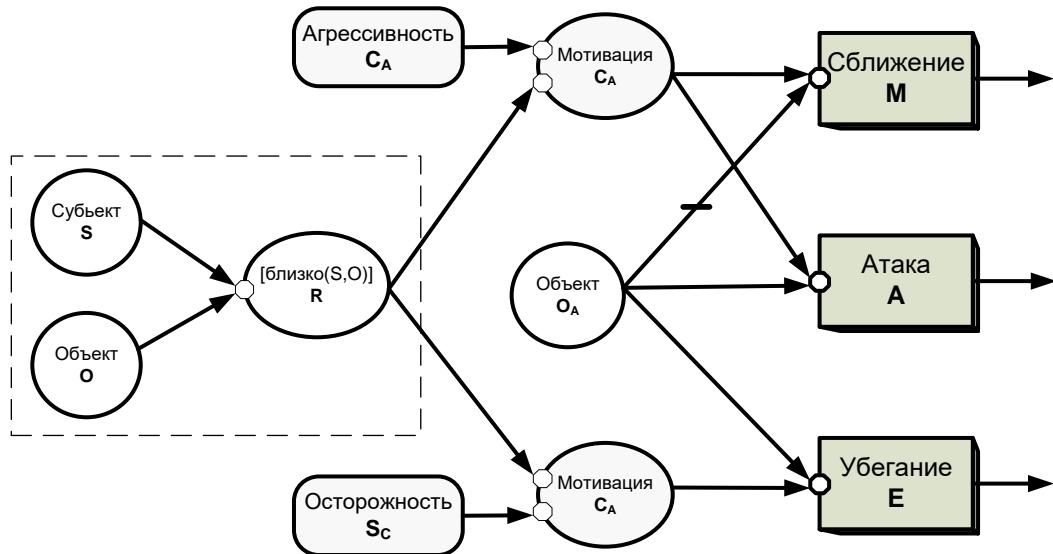


Рис. 3.28. Схема поведения, учитывающая мотивации агрессивности и осторожности

На этой схеме агент обладает двумя мотивациями – агрессивностью и осторожностью. Обнаружив некоторый объект, агент может проявить как агрессию (сближение, если объект далеко, и атака, если объект близко), так и осторожность, т.е. убежать от объекта. Результаты моделирования такой системы становятся еще более неоднозначными и требуют уже иной формулировки задачи.

### 3.7.4. Комментарии к вопросу о подражательном поведении

Подражательное поведение – это один из механизмов, присущий высокоорганизованным особям и являющийся основой для реализации феномена социальной организации. Возможно ли подражательное поведение для особей с ограниченными когнитивными способностями – это один из открытых вопросов. Равно как и вопрос, связанный с формальным определением условий, при которых подражательное поведение становится выгодным.

Зачастую термин “подражательное поведение” используется не совсем оправданно. Например, в [Chatty и др., 2011] описывается схема организации колонии муравьев, основанная на использовании т.н. когнитивных карт. Когнитивные карты являются как средством представления феромонных следов, так и способом реализации подражательного поведения. Суть механизма подражания заключается в том, что вероятность выбора агентом того или иного действия зависит от того, какое действие было выбрано другими агентами. А в [Chernova, Veloso, 2007] описывается механизм обучения на основе демонстраций. При этом суть обучения сводится к тому, что реализуется механизм классификации, построенный на модели гауссовой смеси (Gaussian mixture model). Целью обучения является сопоставление каждой точке признакового

пространства одного из ограниченного числа действий агента. Декларируемое подражание по большому счету здесь сводится исключительно к подаче серии обучающих примеров.

Проблема не в последнюю очередь состоит в необходимости определения того, что такое подражательное поведение и, как следствие, в чем его отличие от процедуры обучения. Не берясь за формальное определение, повторим, что очень важными аспектами подражательного поведения является выявление того, чему и когда, собственно, следует подражать.

В [Гаазе-Рапопорт, Поспелов, 2004] отмечается, что важнейшая задача подражательного поведения заключается в обучении, в формировании двигательных стереотипов, а реализация подражательного поведения требует сложной организации нервной системы. В частности, в памяти должны сохраняться наблюдаемая ситуация, представление о самом себе, представление о другом и мотивах его поведения. Механизм, идеологически близкий к этому подходу, и был рассмотрен выше. Основным допущением при этом было воздействие наблюданной сцены на мотивацию субъекта.

### **3.8. Феномен паразитического управления**

Вернемся к вопросу особенностей рассмотренной выше архитектуры системы управления анимата. Уже говорилось, что наличие механизмов эмоций и темперамента позволяет исследовать различные особенности поведения робота, которые относятся, вообще говоря, к психологическому уровню организации особи. При этом по-прежнему в основе эмоционального компонента архитектуры лежит Информационная теория эмоций Симонова [Симонов, 1982].

Исследование поведения роботов, обладающих эмоционально-темпераментным компонентом, привели к некоторым интересным следствиям. В частности, оказалось, что на этой основе возможно исследование вопросов паразитического управления особью-хозяином, в том числе – такого интересного феномена, как паразитическое зомбирование. Термин "зомби" подчеркивает, что, хотя инфицированный организм выглядит внешне нормально, он представляет собой геном паразита, выражающий свое поведение через тело хозяина.

Анализ источников не обнаружил прямых аналогов такого управления в технических системах. С одной стороны, есть ряд работ, посвященных математическим моделям взаимодействия в системе паразит-хозяин, см., например, [Milner, Patton, 1999]. В работах, посвященных аспектам управления техническими системами, термин "паразит" употребляется скорее в метафорическом смысле, так, как в работе [Borboni, Faglia, 2011]. В последней ряд "подозрительных" (suspicious characters's actions) эффектов, таких, как

вибрация, недостаток мощности, трение и пр., рассматривается с точки зрения паразитических эффектов (по аналогии с воздействиями паразитов в живой природе).

Рассмотрим некоторые возможные механизмы управления или манипулирования сложным поведением технического устройства, при этом полагая, что это управление осуществляется неким простым устройством, аналогом примитивного паразита, управляющего поведением хозяйственного организма (*host*). Итак, нас интересуют механизмы управления поведением сложного объекта (организм-хозяин), использующие крайне ограниченные воздействия внешней системы управления (паразит).

Считается, что манипулирующий паразит может изменить временную последовательность поведенческих ответов своего хозяина, изменить направление реакции хозяина или расщеплять целостное хозяйственное поведение на составные части и/или изменять способы согласования этих частей друг с другом [Poulin, 2013]. В этой работе мы большей частью интересуемся внутренними механизмами паразитического манипулирования поведением хозяина. Паразиты могут воздействовать на поведение хозяина: (1) вмешиваясь в механизмы нормального межнейронного взаимодействия (normal immune-neural communication), (2) выделяя вещества, которые непосредственно оказывают влияние на нейронную активность через негенетические механизмы и (3) стимулируя геномные и/или протеомные изменения в мозгу хозяина (genomic and/or proteomic-based changes) [Adamo, 2013]. Паразиты, скажем плоские черви-сосальщики, расчленяют целостное поведение своего второго промежуточного хозяина – рака-бокоплава или небольшой рыбешки – на отдельные поведенческие реакции и выстраивают их в нужном для себя порядке. Другим примером является воздействие паразитов – гриба *Ophiocordyceps* – на муравьев *Camponotini*. Паразит заставляет инфицированного муравья забраться на подходящий лист растения. Зараженный муравейкусает влажный лист и умирает, сжав челюсти. Эта процедура необходима паразиту для выпуска спор гриба в благоприятных для них условиях [Hughes и др., 2011].

Особенность устройства эмоционально-потребностной системы управления робота заключается в наличии контуров положительной обратной связи, что делает ее, вообще говоря, весьма чувствительной к достаточно слабым воздействиям. Таким образом, паразит, будучи простым, по сравнению с хозяином, объектом с весьма ограниченным спектром возможностей, может коренным образом менять поведение робота, воздействуя на потребностные и оценочные каналы СУ (так, как паразиты манипулируют нейромодуляторной системой), а также влияя на параметры контура обратной связи (непосредственное управление участками мозга).

Термины "простота" и "сложность" в этом случае понимаются в шенноновском смысле, в терминах Машин Тьюринга [Shannon, 1956]. Это означает, что входной алфавит и глубина памяти паразита существенно меньше того, что есть у организма-хозяина.

Итак, наша задача состоит в том, чтобы понять, каким образом паразит, будучи простым устройством, может менять целостное поведение своего хозяина, оперируя лишь очень небольшим количеством управляющих воздействий. Далее мы рассмотрим три механизма паразитического манипулирования аниматом: изменение характера поведения, прямое выстраивание линий поведения и переориентация реакций. Подчеркнем, что наш подход отличен от такого взгляда на паразитическое манипулирование, при котором поведение хозяина рассматривается с точки зрения расширенного фенотипа паразита [Hughes и др., 2011]. Итак, мы не строим модели взаимодействия паразитов и хозяев (host) так, как это происходит в природе. Мы лишь рассматриваем вопросы манипулирования поведением одного технического устройства (host, "хозяин") другим, более простым, примитивным ("паразитом"). А способы этого манипулирования, как будет показано ниже, оказываются аналогичными тем, что наблюдается в живой природе.

### **3.8.1. Изменение характера поведения**

В своей знаменитой работе "Агрессия" Лоренц писал: "*Поведение, единое с точки зрения функции – например, питание или размножение, – всегда бывает обусловлено очень сложным взаимодействием очень многих физиологических причин*" [Лоренц, 1994]. (Неточность оставим на совести переводчика. В оригинале это выглядит так: "*A definite and self-contained function of an organism, such as feeding, copulation, or self-preservation, is never the result of a single cause or of a single drive*", [Lorenz, 2002]). Это в равной степени относится и к поведению. Невозможно выделить "чистое" поведение. Есть некий комплекс, суперпозиция реакций в зависимости от имеющихся у животного потребностей, мотиваций, состояния организма, среды и пр. Чем сложнее организм, тем менее явно можно выделить в его поведении те или иные схемы. Наша же задача – рассмотреть механизмы, заставляющие организм-хозяина выполнять те или иные функции, задаваемые "паразитом". В этом случае с практической точки зрения более целесообразно использовать такие характеристики поведения, как агрессивность, осторожность и т.п. Иными словами, нас интересуют схемы, позволяющие "паразиту" изменять характер поведения анимата.

Была проведена серия экспериментов по имитационному моделированию поведения агента в виртуальной среде. Поле, на котором обитал агент, представляло собой торOIDальную поверхность, на которой располагались зоны с искомой пищей,

области освещенности (неблагоприятный фактор для агента) и препятствия. При этом зоны с пищей располагались внутри освещенных областей, а в некоторых участках внутри кормовой зоны располагались препятствия, Рис. 3.29.

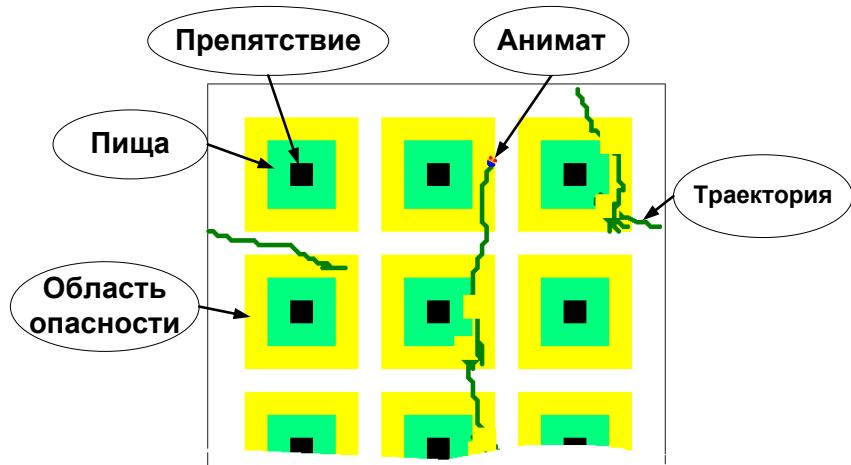


Рис. 3.29. Фрагмент поля – среды обитания анимата

По-прежнему правила поведения агента заключались в том, что он стремится удовлетворить чувство голода, а также избегать освещенных областей и не сталкиваться с препятствиями. Предположим, что цель паразитического манипулирования заключается в том, чтобы заставить агента (робота) как можно больше находиться в освещенной области, неблагоприятной для него. Это – так называемое изменение поведенческих реакций хозяина.

Одним из основных регулируемых "паразитом" параметров являются веса или значимости потребностей. В ходе экспериментов исследовалось, в частности, влияние значения величин тех или иных потребностей на поведение и состояние агента. При этом анализировались такие интегральные показатели, как среднее количество актов приема пищи  $avr(Eat)$ , среднее значение эмоций  $avr(E)$ , дисперсия (variance) совершаемых агентом поведенческих процедур  $var(Proc)$  (чем выше дисперсия, тем более хаотично, нервозно поведение агента), среднее значение чувства голода  $avr(Hungry)$ . Далее рассмотрим, к примеру, как зависит поведение робота от таких параметров, как потребности в пище и самосохранении. При этом значения остальных параметров были таковы, что агент сохранял свою жизнеспособность: если агент умирал от голода, то этот эксперимент считался недействительным и не учитывался в статистике.

**Потребность в еде “need\_food”.** Значение этого параметра изменялось в диапазоне от 50 до 100%. Как видно, существуют некие значения параметров потребностей, при которых количество времени, проводимого агентом в освещенной зоне (цель "паразита") максимальна, Рис. 3.30,а.

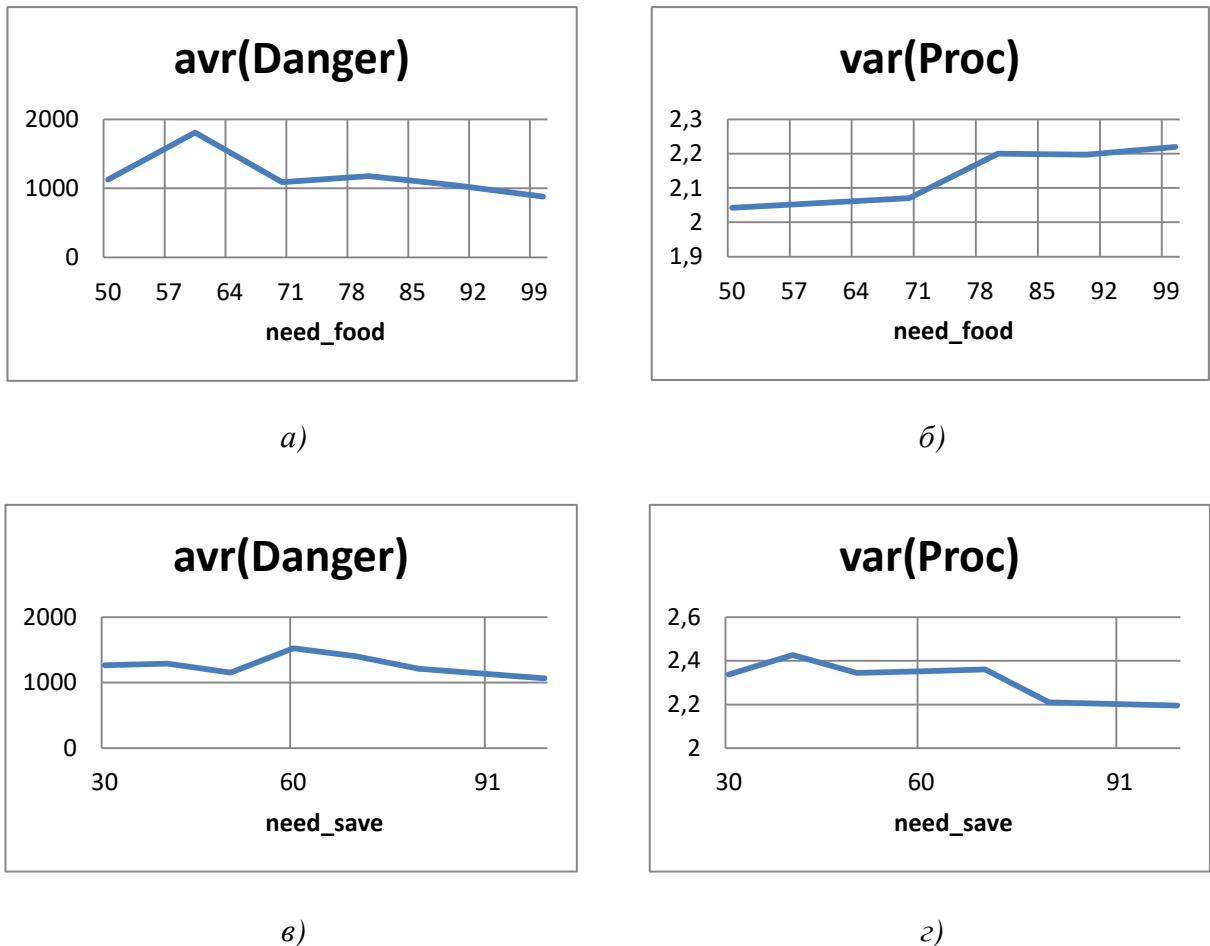


Рис. 3.30. Влияние величин потребностей в еде (а, б) и самосохранении (в, г) на среднее время, проводимое агентом в опасной зоне (а, в) и характер поведения (variance) агента (б, г)

**Потребность в самосохранении “need\_save”.** Значение этого параметра варьируется в пределах от 30 до 100%. Здесь тоже наблюдается эффект манипулируемости поведением агента, Рис. 3.30,в. Однако максимальный эффект изменения поведения наблюдается при изменении коэффициента обратной эмоциональной связи  $k_{em}$ , а также коэффициента обратной связи  $k_{fb}$  в блоке стабилизации, Рис. 2.23.

Интересно, как меняется характер поведения агента, т.е. степень его устойчивости, Рис. 3.30б,г. Интерпретация этого явления выходит за рамки данной работы. Отметим лишь, что увеличение дисперсии выбора той или иной поведенческой процедуры связано с нарастанием конфликта между потребностями в пище и потребностью самосохранения. В случае увеличения значимости параметра потребности в самосохранении поведение робота стабилизируется, он старается избегать опасных мест, платя за это уменьшением количества потребляемой пищи. Подчеркнем, что приведенные результаты экспериментов

характеризуют поведение робота с конкретной архитектурой системы управления, причем в конкретной среде.

Итак, была рассмотрена схема, позволяющая "паразиту" изменять характер поведения анимата. Ее суть свелась к вопросам влияния изменения параметров на поведение организма в целом. В этом случае задача определения управляющих воздействий сводится к поиску в пространстве параметров. С точки зрения "паразита", это – типичная задача поисковой оптимизации, которая может быть решена самыми разнообразными методами. Вплоть до использования примитивного механизма генетических алгоритмов.

### **3.8.2. Прямое выстраивание реакций. Регуляция ФКД**

Если мы имеем дело со сложно организованным организмом, то мы можем влиять на характер поведения. Однако для простого организма возможно выстраивание поведенческих траекторий. Уже приводились примеры того, как плоские черви *Phylum Platyhelminthes* расщепляют целостное поведение хозяина – рыбы *Amphipoda* на отдельные поведенческие реакции, выстраивая их в нужном паразиту порядке. То же самое касается влияния грибов-паразитов *Ophiocordyceps* на муравьев *Catponotinii*. И это – значительно более сложная задача.

Рассмотрим, как может выглядеть паразитическое манипулирование, при котором паразит выстраивает требуемые ему последовательности действий. Так, как, например, поступает гриб *Ophiocordyceps* с зараженным муравьем, заставляя последнего забираться на растения и кусать лист.

Итак, пусть типовое высокоуровневое поведение анимата определяется последовательностями ФКД:

$$B_i = (F_1^i, F_2^i, \dots, F_n^i)$$

Здесь  $B_i$  – некоторая поведенческая последовательность,  $F_j^i$  –  $j$ -й ФКД, характерный для поведения  $i$  (или определяющий поведение  $i$ ).

Пусть в системе имеется множество ФКД  $F_i$ . Порядок формирования последовательностей активаций ФКД может быть варьируемым. На Рис. 3.31 это условно изображено в виде пунктирных связей между вершинами, отвечающими за инициацию соответствующих ФКД. Пусть анимат имеет некоторую сформировавшуюся последовательность ФКД, образующую поведение  $B = (F_1, F_2, F_3)$ . Предположим, что "паразиту" требуется организовать последовательность ФКД  $B' = (F_1, F_4, F_5, F_3)$ .

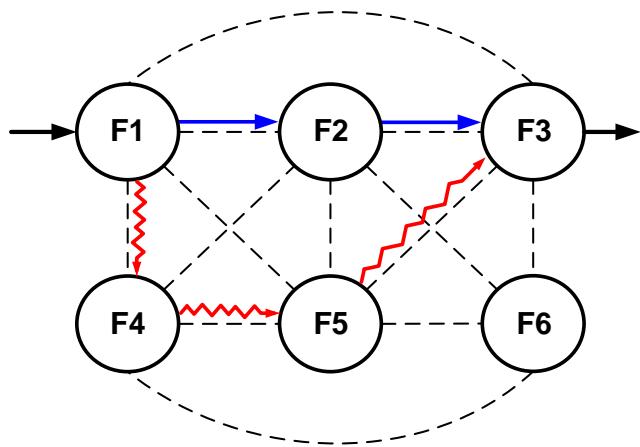


Рис. 3.31. Автомат, управляющий поведением. Пунктирные линии – возможные связи в поведенческой последовательности; сплошные линии – фиксированные связи для исходного поведения; зигзагообразные линии – связи между ФКД, сформированные "паразитом"

Реализация механизма построения поведения  $B'$  заключается в изменении весов связей в переходах между состояниями. Подчеркнем еще раз, что активизация вершин  $F_i$  приводит к запуску соответствующего мета-автомата, реализующего свой ФКД (это – аналог выработки гормона у живых организмов). Это означает, что нижняя (базовая) часть системы управления анимата разделяна на два уровня – уровень управления поведением и уровень реализации ФКД. Условно эти уровни управления изображены на Рис. 3.32.

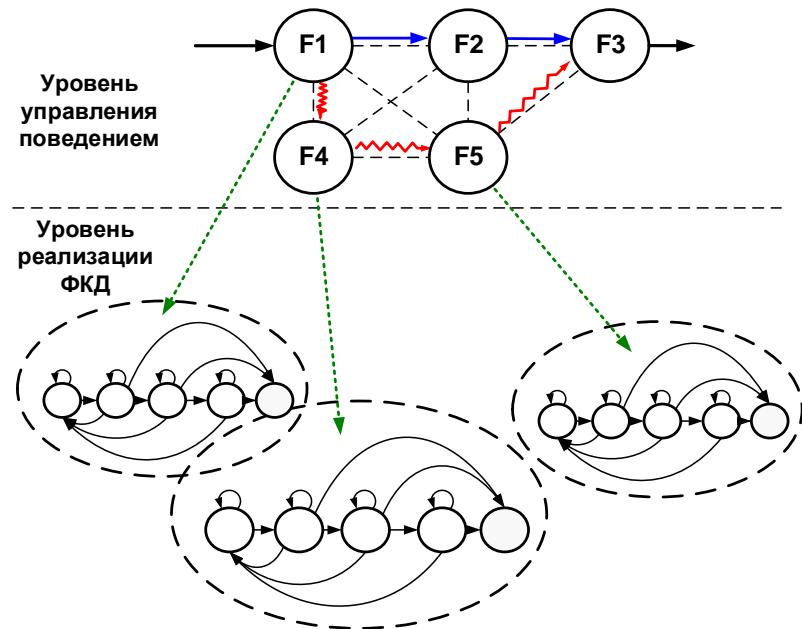


Рис. 3.32. Нижние уровни управления аниматом: уровень управления поведением – на основе  $M^2$ -автомата; уровень реализации ФКД – на основе множества мета-автоматов  $M^l$

При этом последовательности ФКД задаются  $M^2$ -автоматами (выход  $M^2$ -автомата – это запуск соответствующего мета-автомата), а суть паразитического манипулирования

здесь – это изменение структуры  $M^2$ -автомата (изменение элементов матрицы переходов этого автомата). На Рис. 3.32 представлена ситуация, когда структура  $M^2$ -автомата, реализующего последовательность ФКД  $B=(F_1, F_2, F_3)$ , меняется на  $B'=(F_1, F_4, F_5, F_3)$ .

"Паразит" оказывает воздействие именно на автомат, управляющий поведением, достаточно простой и, вообще говоря, линейный. Если бы система управления аниматом представляла собой единый автомат, объединяющий оба уровня, то задача поиска необходимого "паразиту" воздействия на структуру такого мета-автомата была бы трудноразрешимой.

Итак, паразитическое манипулирование, заключающееся в выстраивании последовательностей ФКД, сводится к манипулированию параметрами простой структуры – поведенческого автомата.

### **3.8.3. Переориентация реакций**

Выше мы рассмотрели механизмы изменения характера поведения, а также прямого выстраивания линий поведения. Теперь рассмотрим более сложные формы манипулирования, при которых изменяется цель поведенческих функций организма-хозяина. Одним из примеров проявления влияния паразита (паразитического зомбирования) на организм хозяина является инициация агрессивного поведения.

Агрессивное поведение – это крайне сложный вопрос сам по себе. Функции агрессии, ее значимость, направленность и пр. – все это хорошо освещено в классических работах по этологии. Например, интересный обзор теорий агрессии приведен в работе "Theories of Aggression" [Dennen, 2005].

Здесь же мы сделаем следующее предположение. Пусть наш анимат, будучи примитивным организмом, различает такие сущности окружающего мира, как *опасность* и *угроза*. Будем полагать, что агрессия может быть направлена исключительно и только на угрозу (реакция на опасность стандартна – бегство). Угроза может трактоваться в самом широком смысле. Если проводить аналогии между поведением муравьев и аниматов, то угрозой может считаться все то, что вызывает такие специфические реакции муравья, как кусание или выделение муравьиной кислоты. Такие реакции и будут определять то, что мы будем называть агрессивным поведением.

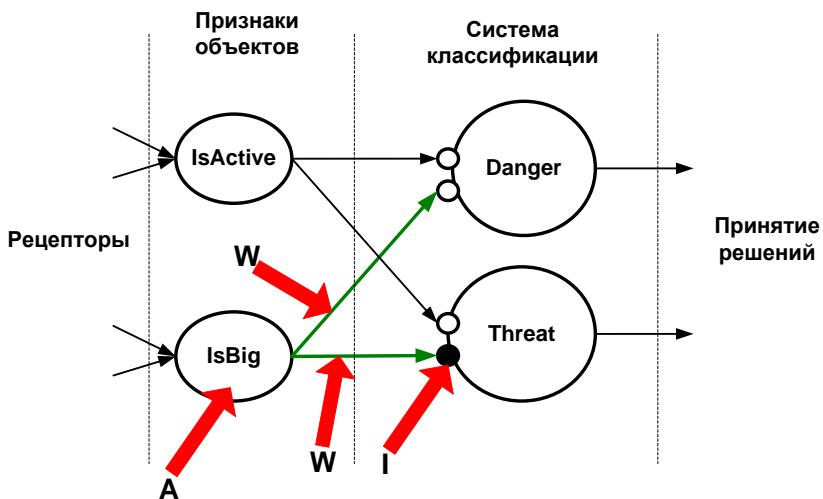
Интересно, что некоторыми исследователями считается, что побудительным мотивом для включения агрессивного поведения является ситуация когнитивного диссонанса. Или наличие противоречивых устремлений у особи. Или неустойчивое эмоциональное состояние, в конечном счете. См., например, [Alvarado, Ramirez, 2014],

исследования на студентах университета, и [Blizard, Adams, 2002], исследования на крысах.

Пусть задача "паразита" заключается в том, чтобы сделать поведение анимата агрессивным. Если считать, что агрессия направлена на то, что анимат считает угрозой, то, фактически, "паразит" осуществляет управление на уровне определения объекта агрессии. При этом оказывается, что сами ФКД хозяина могут оставаться неизменным. Перенаправление агрессии хозяина, т.е. изменение цели поведения, может заключаться в следующем: то, что анимат считал опасным или нейтральным, становится угрозой.

Рассмотрим систему восприятия анимата. На Рис. 2.3 словом *Sensors* были обозначены выходные сигналы системы восприятия верхнего, абстрактного уровня. Это уже сформированные сущности типа "Опасность", "Угроза", "Препятствие" и т.д. Задача "паразита" – исказить эту систему восприятия. Различие между опасностью и угрозой определяется реакцией анимата: от опасности анимат убегает, а на угрозу реагирует агрессией.

На Рис. 3.33 показан пример фрагмента системы восприятия анимата.



*Рис. 3.33. Фрагмент системы восприятия анимата. Светлые синапсы – возбуждающие входы; черный синапс – вход торможения; жирными стрелками показаны возможные объекты воздействия "паразита"*

Пусть рецепторика анимата позволяет сформировать первый уровень абстракции – признаки детектируемых объектов. Такими признаками могут быть понятия "Активность" (вершина *isActive*) и "Большой размер" (вершина *isBig*). Исходя из значений этих признаков, система классификации определяет тип наблюдаемого объекта. Например, если объект активен (движется) и он большой, то это – опасность (вершина *Danger*) для анимата: надо убегать. Если же объект активен, но не большой, то это – угроза (вершина *Threat*), на которую надо отвечать агрессией.

Простейшим способом паразитического манипулирования может быть изменение весов связей, идущих от вершины-признака, которая определяет размер *IsBig* (воздействие W). Кроме того, можно изменить активность самой вершины *IsBig* (воздействие A), а также изменить параметры тормозящего синапса у вершины *Угроза* (*Threat*, воздействие I). Тот же механизм будет работать и в случае детектирования и классификации прочих видов объектов. В любом случае "паразит" заставит хозяина проявлять агрессию, направленную на объекты, которые считались раньше опасными, нейтральными и т.д. Мы не будем приводить примеры "неадекватного" агрессивного поведения зараженных паразитами животных. Отметим лишь, что в мире насекомых проявление именно агрессивного поведения, вызванного паразитическим манипулированием, – это, судя по [Matthews, Matthews, 2010], большая редкость.

Здесь важно отметить следующее. Разумеется, само по себе изменение весов связей – это достаточно тривиальный механизм, такой, который реализуем, например, в простейшей сети искусственных нейронов. Однако наша задача состояла в том, чтобы подчеркнуть наличие семантики, определяемой узлами *Danger* и *Threat*.

Вопросы паразитического манипулирования поведением анимата были более подробно освещены в работе [Карпов, 2017].

**Шизофрения.** Далее следуют некоторые соображения, не относящиеся непосредственно к паразитическому манипулированию, однако касающиеся особенностей организации архитектуры эмоциональной системы управления.

Здесь термин шизофрения понимается как феномен расщепления сознания. Хотя надо отметить, что даже строгое понимание шизофрении связано с неадекватностью эмоциональных реакций. Это, несомненно, говорит о том, что если у робота есть эмоциональная организация, то он вполне может подвергнуться шизофрении. Архитектура эмоциональной СУ отражает существование потребностей и путей их удовлетворения (множество центральных моторных программ). В некотором смысле можно рассматривать СУ как множество агентов с их целеполаганием, потребностями и способами их удовлетворения. Это означает существование конфликтов между агентами, а эмоциональная обратная связь служит механизмом координации работы подсистем, стабилизации поведения в целом. При этом возникающие эффекты неустойчивости, существование автоколебаний в системе (phantomные сигналы, несуществующие потребности и т.д.) можно рассматривать с точки зрения расстройства психики.

## Комментарии к вопросу о манипулировании

Важно, что термины “темперамент робота”, “раздвоение сознания”, “эмоциональное состояние” – это не только метафорическое обозначение или интерпретация состояния технической системы. Подобного рода обозначения определяют способы организации внешнего управления сложной системой. Например, изменение манеры поведения робота может быть осуществлено переводом его характера из, скажем, сангвинического в холерическое.

Разумеется, целью исследований не является демонстрация того, что изменение ограниченного ряда параметров системы управления может привести к изменению поведения системы в целом. Основная мысль была в том, что в системе, которая остается целостной и в общем работоспособной, меняется целеполагание. Причем изменение целеполагания (и поведения на стратегическом, верхнем уровне) осуществляется методами, основанными на механизмах паразитического зомбирования.

Несколько сложнее обстоит дело с пользой от шизофренических эффектов, но, скорее, такие определения и модели могут помочь в диагностировании состояния сложной системы.

Здесь был рассмотрен наиболее простой прием манипулирования. Изучение более сложных принципов управления организмом-хозяином является задачей дальнейших исследований. Например, крайне интересным представляется изучение механизма разделения поведения хозяина на множество отдельных поведенческих актов и дальнейшее выстраивание их в нужном паразиту порядке.

В этой части мы не затрагивали вопрос, каким образом "паразит" физически может вмешаться в работу системы управления роботом. Дело в том, что понятие паразитического управления может трактоваться метафорически. "Паразит" может рассматриваться просто как некий внешний, дополнительный компонент системы управления. Именно поэтому мы чаще использовали термин анимат.

С практической точки зрения одно из следствий рассматриваемых механизмов заключается в том, что "центр тяжести" системы управления роботом находится на уровне реализации базовых поведенческих процедур (ФКД). В этом случае мы говорим о создании простого высокоуровневого компонента системы управления, который реализует методы управления, сходные с паразитическими.

**Примечание. О сложности.** Когда мы говорим о том, что манипулирующий "паразит" имеет простую по сравнению организмом-хозяином структуру, то следует понимать, что управление понимается не в смысле закона необходимого разнообразия,

сформулированного У.Р. Эшби (см. [Эшби, 2017] или [Ashby, 1957]). "Паразит" не занимается решением задачи преобразования полного множества состояний организма-хозяина. Он воздействует лишь на очень ограниченные элементы структуры и параметры хозяина, оставляя всю сложность поведения последнему.

### **3.9. Агрессивное поведение**

#### **3.9.1. О роли агрессии**

В первой главе уже говорилось о том, что одним из базовых механизмов, формирующих социальное поведение, является так называемое агонистическое или агрессивное поведение [Тинберген, 1993]. Агрессивное поведение участвует в формировании многих видов социального поведения, в частности ([Лоренц, 1994], [Shilov, 2002], [Тинберген, 1993]):

1. Поддержание территориального гомеостаза с целью обеспечения жизненного пространства, необходимого для пропитания особи или группы особей (территориальному гомеостазу далее посвящен отдельный раздел).
2. Брачное поведение (поединки между самцами, способствующие отбору более сильных и выносливых животных для продолжения рода).
3. Забота о потомстве, включающая защиту потомства от любых приближающихся к нему животных, в том числе, особей своего вида.
4. Формирование группы с иерархическими отношениями, которые обеспечивают ее управляемость – иерархическую структуру взаимного подчинения.
5. Поддержание группового (стайного, семейного) гомеостаза: в группу не принимают чужаков – особей из других групп.

Крайне важно, что само по себе агрессивное поведение не является отдельным типом социального поведения, как, например, подражательное или родительское. Есть лишь ряд действий, которые сторонний наблюдатель в том или ином контексте может воспринимать как агрессивные.

Вместе с тем, в робототехнике вопрос агрессии рассматривается зачастую весьма своеобразно. Обычно авторы подобного рода работ, используя понятие агрессии и даже иногда ссылаясь на работы этологов, делают это чисто формально, на уровне заимствования терминов. Так, например, в работе [Brown и др., 2005] рассматривается задача борьбы за ресурсы и предлагается заменить бой между роботами для выяснения вопроса, кто из них сильнее, на демонстрацию агрессии (как у животных). При этом величина агрессии определяется тем, какой вклад в выполнение общей задачи может

внести данный робот. Для этого робот подсчитывает количество времени, которое он потратил на достижение цели: если оно больше, чем у соперника, то соперник уступает (отступает назад в узком коридоре и дает пройти более агрессивному). Развитие этого подхода для команды роботов представлено в работе [Zhang, Vaughan, 2006]. Там две группы роботов определяют, какая из них первая пройдет по узкому коридору, а какая уступит дорогу, в соответствии с оценкой потерь, которые при этом понесет та или иная группа.

Присутствует агрессия и в области многоагентных систем. Например, агрессия может рассматриваться как способ разрешения конфликтов, которые возникают при образовании коалиций [Kulinich, 2016]. А в [Scheutz, Schermerhorn, 2004] агент оценивает полезность ресурса, за который идет борьба, и потери, которые он может понести в борьбе за этот ресурс.

Еще одним подходом являются т.н. модели агрессии макроуровня. Например, в работе [Карпова, 2017а] рассматривается задача территориального распределения агентов. При этом уровень агрессии особи определяется такими параметрами, как "накопленная агрессивность", "близость к центру «своей» территории" и численность соседей (своих и чужих). В работах подобного вида описывается не индивидуальное, а групповое поведение.

Нас же интересуют конструктивные, желательно – биологически обоснованные схемы (модели) индивидуального поведения, относящиеся к категории агрессивных. Под конструктивностью схемы понимается возможность ее использования в системе управления робота. Далее мы попытаемся определить компоненты системы управления, влияющие на поведение анимата таким образом, что это поведение расценивается как агрессивное. Главная же задача – исследование способов управления поведением анимата с точки зрения проявления агрессивности.

### **3.9.2. Факторы агрессивного поведения анимата**

#### **Инициирующий фактор**

Итак, агрессия – это способ разрешения конфликта путем непосредственного воздействия на объект-причину конфликта. Действительно, в биологии агрессия рассматривается «как следствие конфликта интересов особи, пары или группы» [Бутовская, 2004]. Конфликт, в свою очередь, – это несоответствие требуемого (целевого) состояния текущему.

Для проявления агрессии необходимо наличие некоторого целевого объекта, на которое осуществляется воздействие.

**Примечание.** Известно, что иногда, в состоянии сильного возбуждения, в отсутствие явного объекта – цели агрессии – выбирается некоторый подходящий (случайный) объект.

Цель оказания воздействия – устранение объекта. Иными словами, цель агрессивного поведения субъекта – преобразование текущего состояния так, чтобы была устранена причина несоответствия, удаление из сцены "мешающего" объекта.

Пусть имеется целевая ( $S_G$ ) и текущая ( $S_c$ ) ситуации. Переход из одного состояния в другое осуществляется с помощью действия (комплекса действий, запуска поведенческой процедуры и пр.)  $Act$ .

$$S_c \xrightarrow{Act} S_G$$

Если  $Act$  – это действие по устраниению причины несоответствия путем оказания на него деструктивного воздействия, то такое действие будем называть агрессивным.

### Стимул-реактивная архитектура

Судя по всему, феномен агрессии может быть рассмотрен в рамках стимул-реактивной архитектуры. Та же потребностно-эмоциональная архитектура по большому счету сводится к стимул-реактивной системе. Рассмотрим далее эту архитектуру с точки зрения агрессивности поведения.

Для наглядности возьмем следующий иллюстративный пример. Пусть имеется анимат со следующими потребности и сенсорными возможностями:

- потребности: пища, вода, самосохранение, отдых, любопытство.
- сенсоры: пища, вода, свет, чужак, усталость\*, голод\*, жажды\*.

Пометка (\*) означает, что это – сенсоры внутреннего состояния организма.

**Примечание.** Мы не будем останавливаться подробно на вопросе потребностей. По А.Н. Леонтьеву, "Потребность есть состояние организма, выражающее его объективную нужду в дополнении, которое лежит вне его" [Леонтьев, 1971]. Перечень их несуществен и для наших рассуждений достаточно условен. Исчерпывающий анализ вопроса потребностей приведен, например, в [Обуховский, 1971]. В этом смысле мы говорим о потребностях анимата типа "любопытство" в некотором метафорическом смысле, вводя их для большей наглядности примеров.

Правила поведения анимата таковы, что анимат избегает света и чужаков. При этом в отсутствие опасных факторов, а также чувств усталости, голода и жажды, анимат "гуляет", т.е. исследует территорию. Здесь "чужак" – это представитель одного и того же с

аниматом вида. Будем понимать агрессию как способ устраниния внутривидовых конфликтов. Реакция на представителя другого вида к категории агрессии не относится.

На Рис. 3.34 представлена укрупненная схема системы управления анимата. Для упрощения описания будем понимать под обобщенным блоком решений те части системы, которые включают в себя шлюзовые элементы, собственно процедурные компоненты, систему тормозящих выходных элементов и эмоциональные обратные связи.

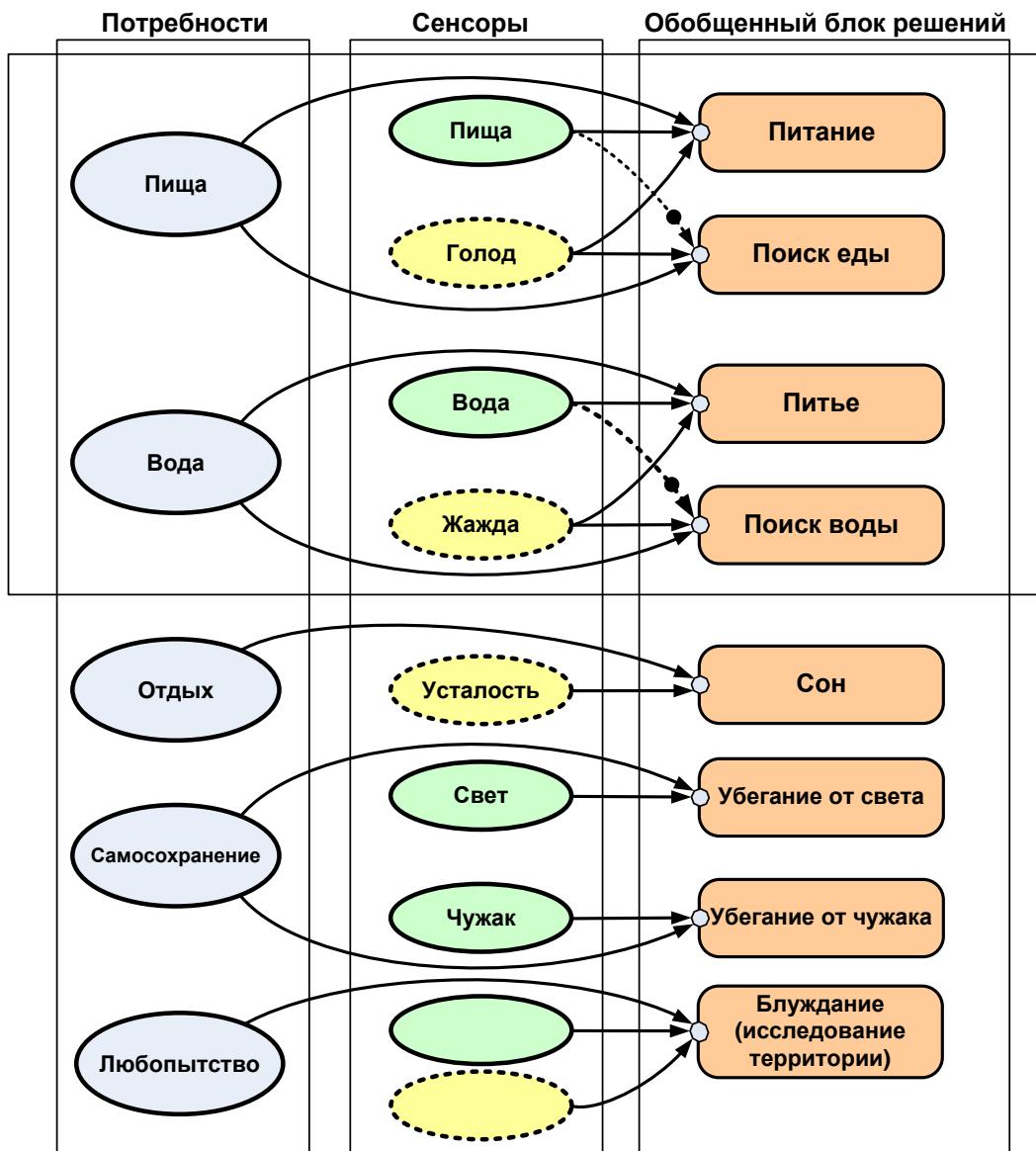


Рис. 3.34. Схема поведения анимата

Мы не будем перегружать схему поведения дополнительными связями, указывающими, например, что любопытство заставляет анимата блуждать (т.е. исследовать территорию) тогда, когда анимат не голоден, не устал, не видит опасность и т.п. То же касается и прочих условий выполнения тех или иных процедур.

Потребности в пище и воде, а также наличие соответствующих сенсоров и поведенческих блоков введены для того, чтобы подчеркнуть наличие одинаковых структур в системе управления, отличающихся лишь одним параметром – "пища" и "вода". То же самое касается и смысла введения боязни аниматом "чужаков" и "света".

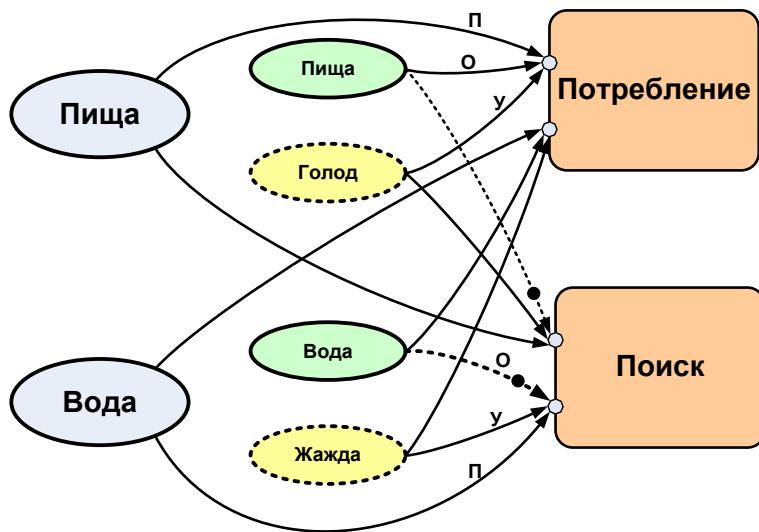
Очевидно, что блоки схемы, связанные с "пищей" и "водой", являются в некотором смысле однотипными, имеющими возможность определенной унификации. Выше мы уже говорили о таком аспекте унификации, как использование обобщенных автоматов. Здесь также имеется возможность введения некоторого обобщения, при котором вводится действие потребления, направленное на "пищу" и "воду" (это – параметры действия). Или действие поиска, определяемое заданной целью – той же "пищей" или "водой".

Обобщение приводит к тому, что процедуры потребления и поиска приобретают несколько точек входа, задающих параметры процедур. Точки входа в общем случае представляют собой тройки типа

$$P = (\Pi, Y, O), \quad (3.8)$$

где  $\Pi$  – потребность,  $Y$  – условие,  $O$  – объект, на который направлено действие.

Например, для процедуры "Потребление" точка входа, связанная с пищей, задается наличием потребности в пище ( $\Pi$ ), условием в виде ощущения голода ( $Y$ ) и объектом потребления – собственно пищей ( $O$ ). На Рис. 3.35 представлена схема организации таких обобщенных процедур.



*Рис. 3.35. Обобщенные процедуры потребления и поиска*

Здесь следует отметить, что возможно дальнейшее обобщение. Например, вводятся абстрактные сущности, называемые "Потребность", "Целевой объект" (то, на что направлено действие) и "Условие", активируемые уже конкретными потребностями, значениями сенсоров и т.п. Однако все это относится уже к уровню непосредственной

реализации поведения, на котором могут быть реализованы поведенческие реакции в виде тех же обобщенных автоматов и пр. Даже схема обобщения на Рис. 3.35 не является удобной для решения нашей основной задачи – определения агрессивных компонентов поведения.

Дело в том, что крайне важно определить явные внутренние конфликты при выборе и совершении тех или иных действий. Эти внутренние конфликты, связанные с невозможностью удовлетворения тех или иных потребностей, определяют эмоциональное состояние анимата. При этом значения частных эмоций, связанных с теми или иными шлюзами действий, задают нам факторы инициации агрессивного поведения. В этом причина того, что для понимания сути вопроса более удобным (хотя и более громоздким) является представление явной схемы поведения, изображенной на Рис. 3.34.

### **Явное задание агрессивного компонента**

Будем полагать, что существует некоторое действие, реализующее тот или иной аспект агрессии – демонстрацию, угрозу, непосредственно нападение и т.п. Механизм реализации этого действия несущественен.

Выше было сказано, что всякое действие определяется тройкой (*Потребность, Условие, Объект*), выр. (3.8). В зависимости от того, каким образом определяются компоненты этой тройки, мы получаем различные схемы поведения с агрессивным компонентом.

Будем полагать, что условием запуска агрессивного поведения будет наличие сильных отрицательных эмоций, связанных с нереализованностью тех или иных потребностей. Напомним, что состояния каждого блока действия характеризуется своей частной эмоцией  $E_i$ . В этом случае условие  $C_{agg}$  агрессивного действия будет определяться эмоциональным состоянием анимата:

$$C_{agg} = C_{agg}(E), E = \{E_i\} \quad (3.9)$$

Здесь  $i=1..L$ ,  $L$  – количество совершаемых действий, а  $E$ , как и ранее, характеризует эмоциональное состояние агента, зависящее от текущих потребностей. "Потребность" в агрессии (или склонность к ней) может являться некоторой функцией, зависящей от самых разных факторов. Например, в простейшем случае она может быть константой, описывающей склонность анимата к агрессии. Или являться функцией, зависящей от расстояния до гнезда, и в этом случае мы получаем проявления феномена территориальной агрессии (что может противоречить мнению некоторых этологов о том, что агрессия – это способ разрешения исключительно внутривидовых конфликтов).

Иногда склонность к агрессии определяется внешними факторами. Например, муравьи ощущают запах кислоты и воспринимают его как сигнал к атакующим действиям, выстреливая кислоту во все, что попадает в поле зрения. Итак, в общем случае текущая склонность или потребность в агрессии  $N_{aggr}$  является функцией от времени  $t$ , внутреннего состояния анимата  $C_{int}$  и состояния среды  $C_{env}$ .

$$N_{aggr} = N_{aggr}(t, C_{int}, C_{env}) \quad (3.10)$$

Наиболее сложный вопрос заключается в выборе объекта агрессии, т.е. на кого эта агрессия направлена. Например, объектом агрессии  $O_{aggr}$  может стать тот объект, с которым связано действие  $R$ , характеризующееся минимальной (максимальной отрицательной) эмоцией:

$$O_{aggr} = \arg R_i; i = \arg \min E.$$

В итоге в общем случае мы получаем активизацию некоторой процедуры  $R_{aggr}$ , которую мы называем проявлением агрессии, с параметром "цель агрессии"  $O_{aggr}$ :

$$C_{aggr}(E) \& N_{aggr}(t, C_{int}, C_{env}) \rightarrow R_{aggr}(O_{aggr})$$

В любом случае фрагмент схемы поведения, дополненный агрессивным компонентом, условно может выглядеть так, как представлено на Рис. 3.36.

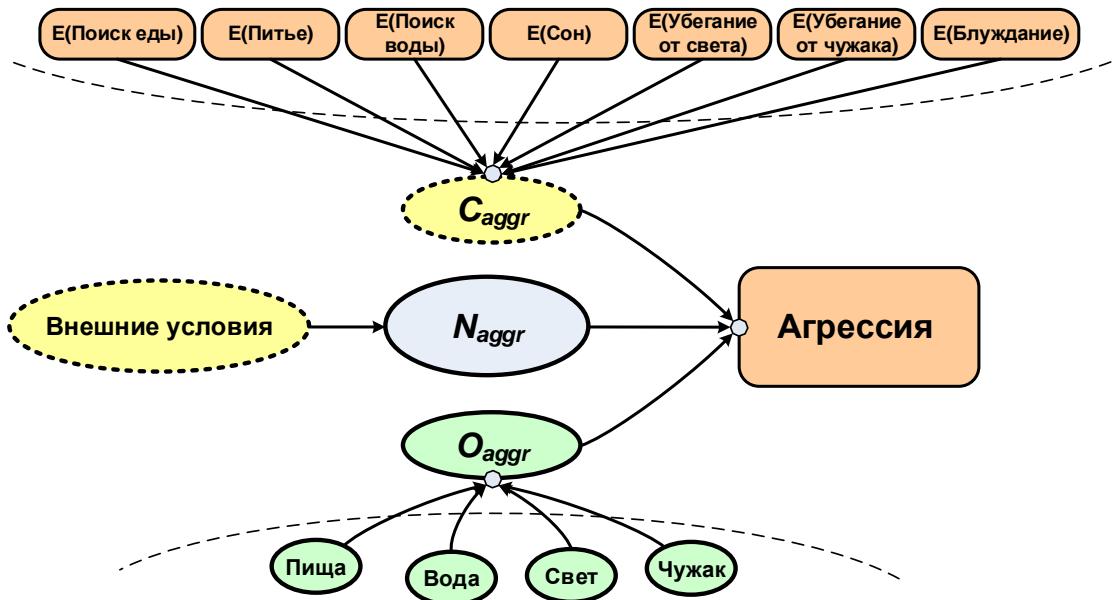


Рис. 3.36. Явное задание компонентов агрессивного поведения

В работе использовались следующие реализации функций:  $R_{aggr}(O_{aggr})$  – это процедура разворота в сторону объекта агрессии  $O_{aggr}$  и принятие угрожающей позы (фактически, генерация некоторого сигнала, воспринимаемого окружающими);  $C_{aggr}$  – это пороговая функция  $C_{aggr}(E) = \begin{cases} 1, & \sigma < \varepsilon \\ 0 & \text{иначе} \end{cases}$ , где  $\sigma = \sum_{i=1}^M E_i$ ,  $\varepsilon$  – некий порог;  $N_{aggr}$  зависит

от времени  $t$ , эмоционального состояния  $E$  и удаленности от базы  $r$  (чем дальше от базы, тем меньше склонность к агрессии):

$$N_{aggr} = \delta_1(t)\delta_2(E)\delta_3(r) = [1 - e^{-t}][1 - e^{-E_{neg}}][e^{-r}]$$

$$\text{Здесь } E_{neg} = \frac{1 - sign(\sigma)}{2}\sigma.$$

### **Внешнее задание агрессивного компонента**

В определенном смысле более простым способом задания агрессивного поведения является рассмотренный выше феномен паразитического манипулирования.

Переориентация реакций, прямое их выстраивание – все эти механизмы манипулирования являются вполне естественными для задания поведения, могущего рассматриваться как агрессивное. Для этого достаточно того, чтобы действия анимата были направлены на своих или чужих – внутривидовая и внешняя агрессия соответственно.

Итак, в любом случае, мы имеем дело с поведением, **оцениваемым** как агрессивное и реализуемым в рамках потребностно-эмоциональной архитектуры анимата. При этом целенаправленное управление этим поведением анимата осуществляется на основе задания такого универсального мотивационного фактора, как эмоция, т.е. оценки рассогласования желаемого и имеющегося состояния системы.

Некоторые примеры группового поведения, использующего понятие агрессии, будут рассмотрены в главе 4.

### **Нейробиологические основы агрессивного поведения**

Отсутствие некоторых специфичных "агрессивных" подсистем (блоков, функциональных узлов) косвенно подтверждается и нейробиологическими исследованиями. Так, согласно работам [Nelson, Trainor, 2007], [Bartholow, 2018], [Thomas, Davis, Dierick, 2015] и [Aleyasin, Flanigan, Russo, 2018] можно сделать следующие выводы.

1. Имеются структуры мозга, играющие критическую роль в обеспечении внимания к эмоционально значимым событиям, которые позволяют организму реагировать на угрозу и адаптироваться таким образом, чтобы обеспечить выживание организма. Гипоталамус, по-видимому, имеет особое значение для агрессии.
2. Области мозга, которые контролируют агрессию, не являются специализированными для этой цели. Агрессия является неотъемлемым свойством более крупной нейронной сети, участвующей в регуляции социального поведения в целом.

3. Предполагается, что структуры префронтальной коры взаимодействуют с сетевыми структурами социального поведения, подавляя или модулируя их активацию.

Это косвенно подтверждает нашу позицию, согласно которой "агрессивность" – это некоторая оценка тех или иных реакций анимата, которые необходимы для реализации ряда важных механизмов взаимодействия, прежде всего – доминирования. О роли агрессии, кроме того, будет сказано ниже, при рассмотрении задачи распределения аниматов по участкам.

### **3.10. Подражание и социальное обучение**

#### **3.10.1. Субъективное Я как явный компонент СУ**

Вернемся к вопросу о субъективном *Я* (*С.Я.*), рассматривая его как конструктивный элемент в явной форме. В социальной психологии *С.Я.* – это то, что человек сам о себе думает и знает. *С.Я.* называют также Я-познающее. Более строго, в психологии *С.Я.* состоит из знаний трех типов, которые вытекают из активной деятельности личности и включают такие компоненты, как: (1) континуальность, т.е. осознание себя одним и тем же человеком в течение онтогенеза; (2) знания об индивидуальности, о своем отличии от других; (3) воля, чувство личного контроля [Знаков, 2005]. В прикладной семиотике существует аналогичное понятие – субъект деятельности. Уже говорилось о том, что включение этого понятия в модель мира формирует т.н. картину мира [Осипов и др., 2018]. При этом полагается, что одной из основных функций субъекта деятельности является целеполагание.

Действительно, *С.Я.* (субъект поведения) позволяет явным образом задавать отношения между сущностями окружающего мира и самим агентом, оценивать ситуацию, определять план действий. Следует отметить, что чаще всего, вне рамок семиотического подхода, *С.Я.* определяется неявным образом. В любом случае оценка близости текущего состояния к целевому, определение местоположения и пр. – все это происходит относительно самого агента. Явное же задание компонента *С.Я.* не только позволяет унифицировать описание картины мира, но, прежде всего, дает возможность создавать модели различных форм поведения, описывающих взаимодействие между агентами.

Прежде, чем будут рассмотрены конструктивные аспекты применения *С.Я.* для описания некоторых форм поведения, сделаем важное замечание. Далеко не все модели социального поведения требуют введения *С.Я.*, несмотря даже на внешнюю сложность и кажущуюся необходимость наличия семиотической модели. Таким примером является

т.н. контагиозное ("заразное") поведение. Напомним, что суть этого поведения заключается в том, что в отсутствие явного стимула, регистрируемого сенсорной системой индивида, за счет внешнего сигнала могут быть запущены различные поведенческие реакции на него. Это – проявление действия сигнальной коммуникации. Так сигнал опасности подхватывается членами группы, заставляя животных проявлять защитную реакцию даже в случае, когда непосредственную угрозу они не видят. Здесь важно, что сигнал инициируется эмоциональным состоянием индивида. И именно "эмоциональный" компонент системы управления является приемником этого сигнала.

### **3.10.2. Знаковая модель подражательного поведения**

Вернемся к вопросу подражательного поведения, но будем рассматривать его уже с позиций знакового подхода.

Напомним, что реализация феномена подражательного поведения требует ответа на следующие вопросы: (1) чему следует подражать, (2) почему это следует делать и (3) кому надо подражать. Будем называть агента, реализующего подражательное поведение, наблюдателем, а того, чьему поведению он подражает – контрагентом (в этологии – конспецификом).

Первый вопрос – это определение того, чему, собственно надо подражать. Т.е. необходимо понять, что делает контрагент или в каком состоянии он находится. Разумеется, определение или распознавание состояния агента – это крайне сложная задача, связанная с анализом сцен, причем зачастую – динамических. По-прежнему будем полагать, что для распознавания состояния агента используется сугубо технический прием, при котором контрагент сам сигнализирует о том, в каком состоянии он находится в текущий момент времени. Именно так в некоторых экспериментах поступают роботы лаборатории робототехники НИЦ "Курчатовский институт". На роботах расположены ИК-маяки, выдающие с частотой 5-10 Гц десятиразрядные коды, определяющие идентификатор робота, его характеристики и код выполняемого в текущий момент времени действия (состояние). Т.е. робот сообщает явно, что он "спит", "ищет пищу", "убегает" и т.п. Этот подход может иметь и некоторое биологическое основание. Итак, каждое действие имеет свое внешнее проявление.

Вопрос обусловленности подражания несколько сложнее. Будем считать, что элементы системы управления, образующие сеть, снабжены еще одним, помимо возбуждающего или инициирующего, дополнительным подтверждающим входом. Это – вход для сигнала от вершины С.Я. Так, действие не будет активировано, если не будет подтверждающего сигнала от С.Я., интерпретируемого как "принадлежность" этого

действия агенту. В определенном смысле это – чувство (ощущение) самости или агентивности, т.е. отождествление или восприятие объекта или совершаемого действия как своего. Без такого ощущения в животном мире происходит рассогласование деятельности. Например, известно сложное психоневрологическое расстройство, называемое "синдромом чужой руки". Одним из его клинических симптомов является наличие у пациента субъективных ощущений чужеродности конечности.

**Примечание.** С точки зрения семиотики действия являются значением знака *С.Я.*, т.е. вопрос обусловленности решается самым естественным образом.

Ответ на вопрос "кому подражать" не является очевидным. Речь идет о том, что при наблюдении контрагента происходит не просто определение степени его похожести или близости к агенту. В простейшем случае так работает запаховая метка у муравьев, которые могут определить эту степень близости: от принадлежности контрагента к своему клану до определения его как совершенно чужого. Важнее то, что происходит отождествление наблюданного объекта (контрагента) с *С.Я.* Это означает, что при наблюдении "близкого" контрагента происходит то же подтверждение самости, что и при активизации вершины *С.Я.* Как происходит это определение степени "похожести" – не существенно. Похожесть чаще всего определяется набором наблюдаемых признаков.

Упрощенная качественная схема модели подражательного поведения приведена на Рис. 3.37. Здесь анимат должен обучиться воспринимать *X* как транспортируемый объект.

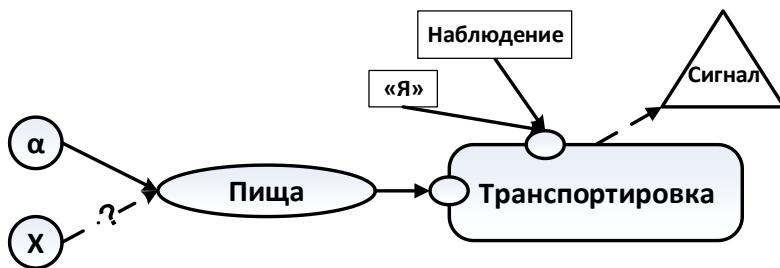


Рис. 3.37. Пример схемы подражательного поведения. Сплошные стрелки – это сформировавшиеся связи. Штрих-пунктирные стрелки – это формирующиеся в ходе подражания связи

Пунктирная стрелка, ведущая к элементу "Сигнал", означает, что состояние вершины-источника может быть зарегистрировано внешним наблюдателем. Вершина "Наблюдение" отвечает за определение близости образа наблюданного контрагента к самому субъекту. На этой схеме вершина *α* отвечает за наблюдаемый набор признаков, приводящих к активизации вершины-детектора "Пища" и далее – соответствующей процедуры "Транспортировка". Связь между *α* и детектором "Пища" уже установлена

(субъект знает, что объект  $\alpha$  подлежит транспортировке), а связь между  $X$  и детектором будет формироваться на основе наблюдений, т.е. подражания. Если агент наблюдает  $X$  и видит, что контрагент совершает действие "Транспортировка" (активен вход "Наблюдение"), то мы получаем систему с активными элементами, между которыми формируется ассоциативная связь. Подчеркнем, что здесь агент не приобретает новый навык, но у него образуются новые стимул-реактивные связи.

Опишем эту схему формально. При этом, напомним, делается сильное допущение, что наблюдению подлежит не только выполняемое конспецификом действие, но и то, на что направлено или чем определено это действие, т.е. стимул. Пусть поведение анимата включает продукции вида

$$S_m \rightarrow R_m \quad (3.11)$$

где  $S_m$  – стимул,  $R_m$  – реакция. В терминах семиотической модели  $S_m$  и  $R_m$  – компоненты "значение" соответствующих знаков [Осипов и др., 2018]. Далее мы будем опускать нижний индекс  $m$  там, где понятно, о чём идет речь.

Активизация реакции требует наличия еще одного условия – определения принадлежности реакции субъекту, т.е. чувства "самости". Это означает наличие дополнительного компонента – элемента *Self: Я* или *субъективное Я (С.Я.)*. На самом деле реакция  $R_m$  может входить и в "значение" знака *Self*, однако удобнее считать  $R_m$  отдельным знаком.

Представим правило (3.11) в виде:

$$\omega_{S,R} S_m \wedge \omega_{self,R} Self \rightarrow R_m \quad (3.12)$$

Здесь  $\omega_{i,j}$  – сила связи между элементами  $i$  и  $j$ ,  $0 \leq \omega_{i,j} \leq 1$ . В данном случае – между наблюдаемым стимулом и реакцией и между вершиной *Я* и реакцией  $R_m$  (т.е. насколько реакция  $R_m$  рассматривается как "своя"). Активность элемента *Self* определяется либо тем, что действие инициируется самим агентом, либо, как будет сказано далее, результатом наблюдения за контрагентом  $A'$ , т.е.

$$Self = I \vee Obs(A') \quad (3.13)$$

Здесь  $I$  – результат активации *С.Я.* (чувство самости),  $Obs(A')$  – результат сопоставления контрагента  $A'$  с *С.Я.* (определение вида "свой").

Будем полагать, что активность элемента  $R_m$ , в свою очередь, определяет выполнение некоторого действия или каскада действий. Т.е.  $R_m$  может интерпретироваться как аналог некоторого командного или моторного нейрона. Кроме того, действие сопровождается выдачей некоторого сигнала *Signal*, который позволяет контрагенту определить состояние текущего агента:

$$R_m \rightarrow Signal.$$

Предположим, что стимул  $S_m$  является обобщенным понятием, определяемым конкретными значениями  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ . Например, стимулом  $S_m$  для действия  $R_m$  "Транспортировка" может быть понятие "Еда", а  $\alpha_i$  – это значения знаков – конкретных видов съедобных объектов.  $\alpha_i$  могут определяться как величины, характеризующие активность наблюдаемых признаков. В таком случае  $S_m$  определяется как

$$S_m = \omega_{\alpha 1, S} \alpha_1 \oplus \omega_{\alpha 2, S} \alpha_2 \oplus \dots$$

Изобразим эту схему так, как показано на Рис. 3.38

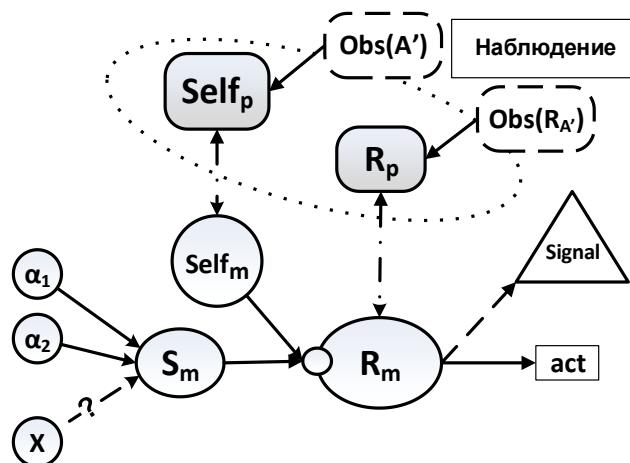


Рис. 3.38. Сплошные линии – установленные связи между элементами-значениями.

Штрих-пунктирные линии – связи между компонентами знака: образ (перцепт)-значение

Рисунок иллюстрирует этот процесс подражательного поведения: взаимодействие конспецифика с объектом  $X$  приводит к появлению у агента-наблюдателя ассоциативной связи между  $X$  и знаком Стимул ( $S_m$ ) в силу того, что при этом наблюдении возбуждаются знаки агента  $Self$  и  $R_m$ . На самом деле, помимо того, что знак  $Self$  ( $\mathcal{Y}$ ) необходим для реализации свойства агентивности (принадлежности действия), он превращает модель мира анимата в картину мира, в которой присутствует знак "субъект поведения".

Будем считать, что приведенная стимул-реактивная схема подчиняется общему правилу формирования ассоциаций: между одновременно активными элементами системы возникает связь, величина которой зависит от степени активности этих элементов, величины уже имеющейся связи и т.п. Это означает, что между активными элементами системами возникает связь, величина которой зависит от количества этих одновременных возбуждений. Фактически, речь идет о классической схеме формирования рефлексов. Формально это можно описать так.

Пусть в некоторый момент времени  $t$  имеется множество из  $K$  активных элементов

$$Q = \{q_i / q_i \neq 0\}, i=1..K. \quad (3.14)$$

Тогда между всеми парами элементов множества  $Q$  формируются связи, значения которых определяется как

$$\omega_{i,j}(t) = \omega_{i,j}(t-1) \oplus \delta, q_i, q_j \in Q, 0 < \delta < 1, \omega_{i,j}(0) = 0 \quad (3.15)$$

Здесь  $\omega_{i,j}$  могут трактоваться как коэффициенты уверенности, вероятности и пр., т.е. величины, характеризующие силу причинно-следственных связей, степень ассоциаций. Вопрос о симметричности  $\omega_{i,j}$  для нас не существенен, равно как и то, насколько определяют величину  $\omega_{i,j}$  геометрические или топологические характеристики системы (удаленность).

Теперь рассмотрим следующую ситуацию. Пусть анимат наблюдает, что контрагент  $A'$  совершает некоторое действие  $R_m$  по отношению к объекту  $X$ . При этом  $X$  ранее не рассматривался субъектом, как определяющий фактор для стимула  $S_m$  (связь  $X-S_m$  не входила в личный опыт субъекта). Наблюдение за действиями контрагента приводит к активизации образа (перцепта) знака  $R_p$ . Наличие связи перцепт-значение означает активизацию элемента-значения  $R_m$ :

$$Obs(R_{A'}) \rightarrow R_p \rightarrow R_m$$

Здесь  $Obs(R_{A'})$  – результат наблюдения (распознавания) реакции или действий контрагента  $A'$ . В то же время наблюдаемый контрагент сопоставляется с С.Я.: активизируется перцепт  $Self_p$ , что приводит к активности  $Self_m$ :

$$Obs(A') \rightarrow Self_p \rightarrow Self_m$$

Таким образом, в возбужденном состоянии оказываются все компоненты схемы:  $R_m, S_m$  и собственно объект наблюдения  $X$ . Между  $X$  и  $S$  формируется ассоциативная связь:

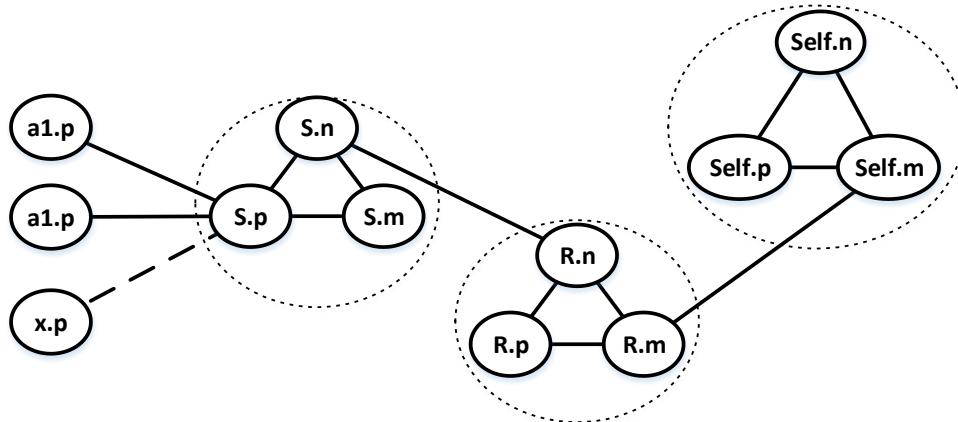
$$\omega_{X,S}(t) = \omega_{X,S}(t-1) \oplus \delta$$

Итак, в ходе наблюдения за поведением конспецифика объект  $X$  включается в поведенческий опыт анимата. Это и есть подражательное поведение.

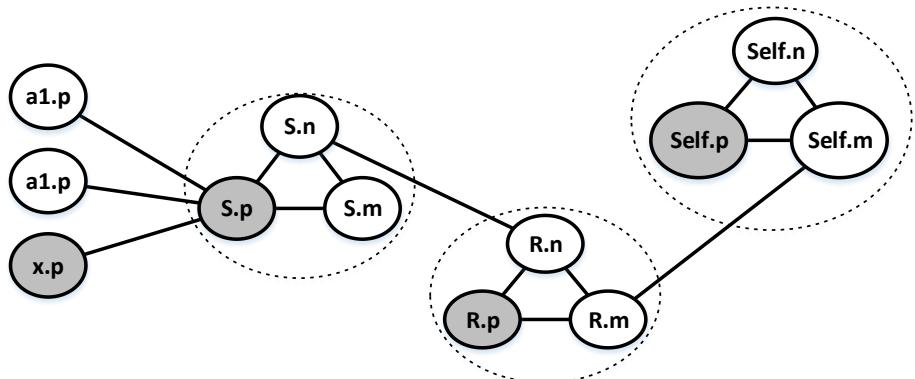
**Замечание о связях.** Когда мы говорим о том, что возникают связи между активными вершинами, то подразумевается следующее. Связи между элементами семиотической сети бывают двух видов: заданные априори при создании сети (то, что можно назвать "генетически" определенными) и т.н. факультативные связи, которые могут быть активированы потенциально, т.е. образующиеся в ходе обучения. Именно эти факультативные связи становятся активными, когда активны соответствующие им вершины. В противном случае в сети начнут формироваться неконтролируемые и лишенные смысла связи. Подобного рода связи могут иметь аналогию с сильными и

слабыми связями между членами социальных сетей. В работе [Кузнецов, 2016б] описываются различного рода эффекты и особенности информационного обмена в таких сетях, и подчеркивается особая значимость именно слабых (здесь – факультативных) связей. К сожалению, этот весьма важный и интересный вопрос выходит за рамки настоящего исследования.

Более строго пример формирования новых связей в ходе обучения проиллюстрирован на Рис. 3.39 и Рис. 3.40.



*Рис. 3.39. Начальное состояние системы: все вершины неактивны, имеются априорные связи между знаками и компонентами знака. Связь S.p-х.p является факультативной (выделена пунктиром)*



*Рис. 3.40. Ситуация наблюдения за действиями контрагента*

Активизируются вершины  $Self.p$  (наблюдаются контрагент),  $R.p$  (наблюдаются, что контрагент совершает действие  $R.m$ ),  $x.p$  (наблюдаются объект  $x$ ). Факультативные связи между одновременно активными вершинами становятся активными. Здесь это связь между вершинами  $S.p$  и  $x.p$ . Объект  $x$ , таким образом, становится компонентом  $S.m$ .

Подчеркнем еще раз, что основное отличие контагиозного поведения от подражательного заключается в том, что в последнем речь идет если не о приобретении новых навыков, то, по крайней мере, в формировании ассоциативных связей. Причем это

становится возможным в силу того, что в схеме управления определяется вершина С.Я. (в терминах семиотики – введение субъекта деятельности в модель мира).

**Примечание.** В теории функциональных систем П.К. Анохина глубоко и исчерпывающе описаны вопросы организации рефлекторной деятельности [Анохин, 1998]. Здесь же рассматриваются иные, упрощенные схемы и модели, не требующие привлечения механизмов афферентации, явной оценки результатов и пр. К тому же есть основания полагать, что процессы, протекающие у высокоорганизованных животных, не обязательно должны соответствовать тому, что наблюдается у основных модельных объектов исследования – насекомых.

### 3.10.3. Социальное обучение

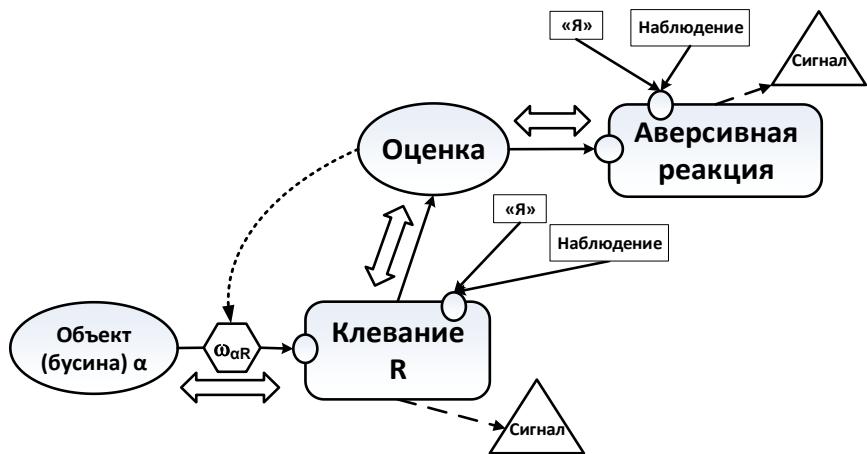
Компоненты С.Я. и "Наблюдение" позволяют описать такой интересный и важный феномен поведения, как социальное обучение (или обучение на чужих примерах).

Социальное обучение – это термин, который используется в этологии по отношению к способностям животных приобретать опыт, связанный с взаимодействием с другими особями [Резникова, 2004]. Среди множества видов социального обучения в настоящей работе нас интересует то, которое связано с формированием условных рефлексов. Таких, например, которые наблюдаются в экспериментах с цыплятами: цыплята избегают пищевых единиц характерного вида, если эта пища вызывала реакции отвращения у их сородичей. На самом деле здесь речь идет о т.н. социальной передаче избегания у цыплят. Эффект выглядит так. Новорожденным цыплятам предъявляют бусину, смоченную жгучим веществом, и те клюют ее. Поскольку бусина оказывается жгучей на вкус, клюнувшие ее цыплята демонстрируют аверсивную поведенческую реакцию и в дальнейшем, естественно, отказываются клевать такие бусины. Однако замечено, что если другой цыпленок наблюдает процесс обучения, то далее он также начинает избегать клевания таких бусин. У цыпленка-наблюдателя образуется рефлекс. Аналогичные эффекты наблюдаются и у мышей, см., например, [Ивашкина и др., 2019].

**Примечание.** Мы не будем обсуждать вопрос о том, является ли социальное обучение частным случаем подражательного обучения или наоборот. Как минимум, описываемая далее схема требует включения дополнительных элементов и механизмов.

Рассмотрим схему организации социального обучения, приводящего к выработке новых рефлекторных реакций, в данном случае – реакции избегания. Фактически, здесь речь идет о некоторой модификации известной схемы формирования условного рефлекса. Когда контрагент (далее – конспецифик) клюет бусину, происходит оценка результатов

этого действия. Результат действия оценивается и, в зависимости от него, изменяется величина связи между стимулом (бусина  $\alpha$ ) и действием (клевание  $R_m$ ). Например, в рамках автоматных моделей М.Цетлина величина  $\omega_{i,j}$  может трактоваться как вероятность перехода системы из состояния  $i$  в  $j$ , значение которой увеличивается при положительной оценке (поощрение) и уменьшается при негативной (наказание) [Цетлин, 1969]. Или же можно использовать схему весовых коэффициентов, которая была в модели подражательного поведения.



*Рис. 3.41. Общая схема формирования реакции избегания. Двойными стрелками показано, что связь между компонентами является фактически двунаправленной*

Введение явного компонента С.Я, а также компонента "Распознавание" позволяют описать процесс формирования такого же рефлекса и у наблюдателя. Это происходит из-за фактической замены сигнала Я наблюдаемым образом. Наблюдение за аверсивной реакцией конспецифика в случае его отождествления с С.Я. приводит к активизации вершины "Оценка", которая, в свою очередь, изменит вероятность (или силу связи)  $\omega_{ij}$  между стимулом  $i$  и действием  $j$ . Т.е. образуется аналогичный рефлекс и у наблюдателя. Вторым важным моментом является необходимость признания наличия двунаправленных (взаимных) связей между компонентами. Рис. 3.41 – это типичная "функциональная" схема, описывающая направления движения информации так, как это делается в классической теории управления. Однако переносить такой подход на процессы, происходящие в нервной системе, не совсем корректно: связи между нейронами или ансамблями нейронов имеют, повторим, двунаправленный, ассоциативный характер.

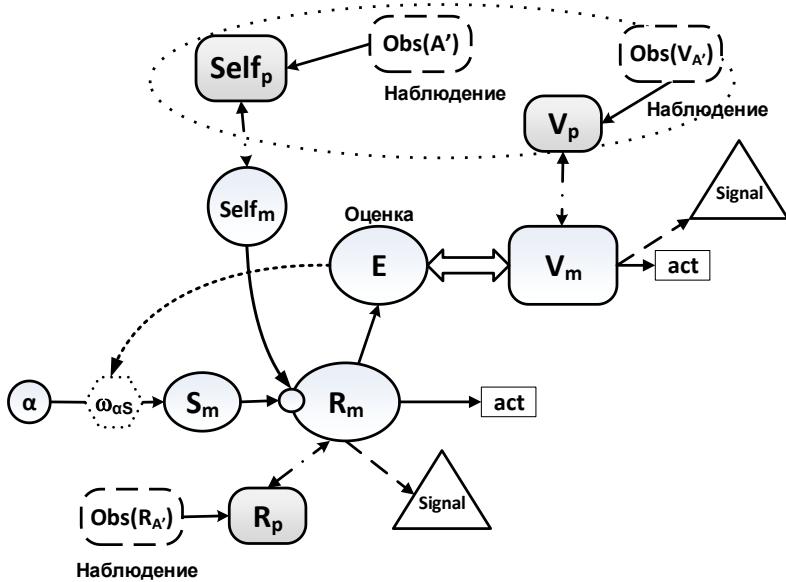


Рис. 3.42. Схема социального обучения. Пунктирная стрелка – влияние результатов оценки  $\mathcal{E}$  на силу ассоциативных связей между  $\alpha$  и  $S_m$

Работа элемента  $\mathcal{E}$  заключается в следующем. Система ("организм" анимата) оценивает свое состояние. Если в течение некоторого короткого промежутка времени имеется негативная или позитивная реакция, то считается, что эта реакция связана с выполненным действием. Тогда соответствующим образом изменяются ассоциативные связи между активными в этот интервал времени элементами. Механизмы реализации самой этой оценки будем считать заданными априори, фиксированными и неизменными ("заложенными генетически"). В любом случае мы полагаем, что анимат знает, что такое хорошо и что такое плохо. Биологические основания механизма оценки связаны с механизмом формирования рефлексов. Вопросы временных соотношений между ассоциируемыми раздражителями описаны, например, в [Данилова, Крылова, 2005].

Формально мы имеем схему, аналогичную схеме подражательного поведения, но в которую добавлены два элемента – элемент оценки  $\mathcal{E}$  и знак  $V$ , отвечающий за представление понятия аверсивной реакции. В этой схеме агент, помимо восприятия конспецифика  $A'$ , наблюдает за его аверсивной реакцией  $Obs(V_{A'})$  и действием  $Obs(R_{A'})$ .

Связь между  $\mathcal{E}$  и  $V_m$  является двунаправленной, что позволяет реализовать следующую цепь возбуждений или активаций:

$$Obs(V_{A'}) \rightarrow V_p \rightarrow V_m \rightarrow \mathcal{E}$$

В свою очередь оценка  $\mathcal{E}$ , являясь негативной, уменьшает силу связи  $\omega_{\alpha S}$ , в результате чего субъект перестает воспринимать  $\alpha$  как стимул.

Рассмотрим схему обучения формально. Для реализации процедуры социального обучения необходимо задать упорядоченную пятерку  $Se$ :

$$Se = \langle \mathcal{O}, \mathcal{P}, \mathcal{M}, \Omega, \mathcal{E} \rangle \quad (3.16)$$

где

$\mathcal{O}$  – вектор результатов наблюдений

$$\mathcal{O} = (Obs(A'), Obs(V_{A'}), Obs(R_{A'}))$$

$\mathcal{P}$  – вектор перцептов знаков:

$$\mathcal{P} = (Self_p, V_p, R_p)$$

$\mathcal{M}$  – вектор значений знаков:

$$\mathcal{M} = (Self_m, V_m, R_m)$$

$\Omega$  – матрица весовых коэффициентов, характеризующих связи между элементами знаковой системы.

Оценка действия  $\mathcal{E}$  определяется как функция от аверсивной реакции  $V$  и от некоторых внутренних механизмов оценки состояния анимата  $\mathcal{E}_{int}$ :

$$\mathcal{E} = f(V) \vee h(\mathcal{E}_{int})$$

В простейшем случае

$$\mathcal{E} = \omega_{V\mathcal{E}} V \oplus \mathcal{E}_{int}.$$

Здесь  $\oplus$  – это рассмотренная выше операция нечеткой алгебраической суммы. В случае наблюдения за конспецификом составляющая  $\mathcal{E}_{int}$  может отсутствовать.

Рассматриваемые элементы модели  $Se$  являются некоторой частью общей знаковой системы, из которой мы выбрали лишь те, которые имеют отношение к конкретному эффекту. В процессе обучения выполняется следующая процедура:

1. Определение активности элементов вектора  $\mathcal{P}$ :

$$\mathcal{P} = \Omega_{\mathcal{O}}^{\mathcal{P}} \mathcal{O},$$

где  $\Omega_{\mathcal{O}}^{\mathcal{P}}$  – подматрица  $\Omega$ , описывающая связи между наблюдениями и перцептами.

2. Определение активности элементов вектора  $\mathcal{M}$ :

$$\mathcal{M} = \Omega_{\mathcal{P}}^{\mathcal{M}} \mathcal{P},$$

где  $\Omega_{\mathcal{P}}^{\mathcal{M}}$  – подматрица  $\Omega$ , описывающая связи между перцептами и значениями.

3. Вычисление оценки  $\mathcal{E}$ :

$$\mathcal{E} = \omega_{V\mathcal{E}} V_m$$

4. Изменение весов связей между активными элементами, если  $\mathcal{E} \neq 0$ :

$$\omega_{ab}(t) = \omega_{ab}(t-1) \delta, \quad a \in Q, \quad b \in Q$$

Напоминаем, что здесь речь идет о наблюдении за аверсивной (негативной) реакцией, в результате чего должны ослабевать ассоциативные связи. В общем же случае надо было бы учитывать знак оценки  $\mathcal{E}$ .

Вопрос о том, какие связи и как затрагивает "оценочный" элемент  $\mathcal{E}$ , представляется крайне важным, т.к. центральная проблема процедуры обучения – это определение кого, за что и как наказывать/поощрять. Разумеется, оценка должна быть универсальной процедурой и затрагивать изменение связей между всеми парами активных элементов. Но некоторые связи мы можем считать "прочными", "постоянными", слабо подверженными изменениям, а другие – вариабельными. Так, постоянной можно считать стимул-реактивную связь между  $S_m$  и  $R_m$ , а связь между наблюдаемым объектом  $\alpha$  и понятием "стимул  $S_m$ " – варьируемой. Для этого достаточно полагать, что

$$\omega_{S,R} >> \omega_{\alpha,S}.$$

Описанный выше подход к формированию социального рефлекса объясняет, в частности, разницу между собственным опытом и тем, который был приобретен в результате обучения (обучение на ошибках других). Собственный опыт является более устойчивым, прочным и продолжительным во времени. Чужой же забывается гораздо быстрее. Это объясняется тем, что активность компонентов **Я** и "*Наблюдение*" разная. Отождествление действий и реакций наблюдаемого контрагента не дает полного тождества с **С.Я.**, т.е. рефлекторные связи активируются слабее. Эти вопросы рассматривались в работах [Карпов, Ивашкина, 2019], [Карпов, 2019a].

Здесь важно отметить, что речь идет о поведении, отличном от подражательного и тем более – контагиозного. Отличие это заключается в том, что здесь фигурирует компонент "*Оценка*", отсутствующий в схеме подражательного поведения.

**Примечание 1.** Схемы подражательного поведения и социального обучения имеют в своей основе компонент отождествления **Я** с конспецификом, определения степени их близости. В природе это отождествление, возможно, сходно с тем, что называется родственным отбором, когда эволюционно выгодным становится поведение, определяемое степенью родства взаимодействующих особей, см., например, работу Уилсона [Уилсон, 2020].

**Примечание 2.** В работе феномены подражательного поведения и социального обучения рассматриваются с точки зрения ассоциантистского подхода: поведение первого лица выступает для второго в качестве различительного стимула, который запускает реакцию, ведущую к подкреплению [Хегенхан, Олсон, 2004].

### **3.11. Выводы к главе 3**

В этой главе были рассмотрены вопросы локального взаимодействия роботов в группе как на уровне целостной системы (макроуровень), так и с точки зрения индивидуального устройства, т.е. архитектуры анимата.

Во-первых, были рассмотрены типовые задачи групповой организации и управления на основе введенного формализма – статического роя. Это модели макроуровня.

Во-вторых, был рассмотрен вопрос механизмов языкового общения между членами группы. Предложенная модель рассматривала систему управления робота с позиций семиотики, т.е. как знаковую систему. Это позволило не только предложить решение задачи непосредственного общения (базового механизма функционирования социума), но и реализовать на его основе производные феномены, такие, как контагиозное и отчасти подражательное поведение.

Важно, что с позиций семиотики рассматривалась основная эмоционально-потребностная архитектура системы управления аниматом, без введения дополнительных сущностей. Знаковая интерпретация триады "потребность-сенсорика-действие" позволила естественным образом реализовать множество различных феноменов как социального, так и индивидуального поведения и взаимодействия. В частности, на этой основе была рассмотрена схема подражательного поведения робота, основанная на наблюдении субъекта за поведением других членов группы. Эксперименты подтвердили, что результат наблюдения оказывают воздействие на поведенческую мотивацию агента. Но не менее важным результатом явилось понимание того, что целесообразность применения подражательного поведения далеко не однозначна и определяется сложностью решаемых задач и степенью когнитивных способностей субъекта.

Итак, основными итогами и результатами данной главы является следующее:

1. Введено понятие статического роя как формальной модели, описывающей специфику локального взаимодействия агентов.
2. Рассмотрена задача определения лидера в группе и предложены два метода ее решения: механизм прямого определения лидера и алгоритм выбора лидера путем голосования.
3. Была рассмотрена задача дифференциации функций и распределение функций (задач) в статическом рое, приведена процедура распределения ролей на примере решения задачи стайной охоты.

4. Предложена интерпретация системы управления анимата как знак-ориентированной системы.
5. Показано, каким образом на базе знак-ориентированной системы строятся схемы контагиозного и подражательного поведения.
6. Были рассмотрены способы управления сложной системой – аниматом – на основе принципов паразитического манипулирования.
7. В рамках потребностно-эмоциональной архитектуры анимата был рассмотрен вопрос определения т.н. агрессивного поведения. Были предложены механизмы описания факторов агрессивного поведения, определены механизмы манипулирования таким поведением. Показано, что целенаправленное управление агрессивным поведением анимата осуществляется на основе задания такого универсального мотивационного фактора, как эмоция.
8. Было показано, что введение явного компонента "Субъективное Я" позволяет естественным образом реализовать такие феномены, как подражательное поведение и социальное обучение. В основе моделей лежит понятие степени близости наблюдаемого контрагента (*конспецифика*) к субъекту.

## ГЛАВА 4. ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ

Верификация разрабатываемых моделей и алгоритмов требует их экспериментальной отработки и апробации, для чего необходимы некоторые показательные, комплексные задачи. Такими задачами, имеющими к тому же практическую значимость, являются исследование территории и патрулирование. Рассмотрим далее подходы к их решению с точки зрения использования механизмов социального взаимодействия.

### **4.1. Агрессия в задаче территориального распределения**

#### **4.1.1. Пищевое поведение**

В мирмекологии описывается такой интересный феномен, как "профессиональная карьера" муравьев. Суть этого явления заключается в следующем. Изначально молодой особи достается самый неудобный, удаленный от гнезда кормовой участок. В ходе освоения этого участка, по мере роста опыта и т.п., муравей постепенно переходит на более удобные, расположенные все ближе к гнезду участки. Вершиной профессиональной карьеры является получение места наблюдателя на куполе гнезда. При этом опытный муравей, прошедший весь этот сложный путь роста, хорошо знает всю ту территорию, которую он успел освоить в процессе своей длительной трудовой деятельности. См., например, упомянутые работы Захарова [Захаров, 2015] или Длусского [Длусский, 1967], [Dlussky, Voltzit, Sulkhanov, 1978]. Этот механизм освоения территории характерен для муравьев рода *Formica*, однако есть все основания полагать, что он имеет и сугубо техническую целесообразность с точки зрения стратегии решения задач территориального поведения искусственных агентов – роботов.

Попробуем далее определить, каким образом могла бы решаться задача воспроизведения такого феномена, какие базовые механизмы могут лежать в основе этого поведения. Анализ описания феномена пищевого поведения (см. ту же работу [Захаров, 2015]) позволяет предположить, что схема поведения муравья на "алгоритмическом" уровне выглядит следующим образом.

#### **Общая схема поведения**

1. В начале "трудового дня" муравьи выходят из гнезда и начинают движение по дороге.
2. Обнаружив свободный кормовой участок, муравей начинает его освоение. При этом он, благодаря хорошей памяти, запоминает сам участок и его окружение.

3. Если на участке появляется другой муравей, то происходит некий конфликт, в результате которого более молодой или неопытный индивид изгоняется с территории.
4. В результате естественной убыли (смерть, потеря ориентации и т.д.) некоторые участки остаются без хозяина. Поскольку муравьи, судя по всему, вовсе не стремятся отправиться именно на свой участок, а пытаются занять первый попавшийся, то рано или поздно на оставшийся без хозяина участок находятся претенденты.
5. Из претендентов на спорном участке остается наиболее агрессивный (опытный, старый) муравей.

Итак, эта достаточно четкая схема поведения включает в себя два важнейших компонента: механизм памяти и механизм разрешения конфликта (то поведение, которое можно отнести к категории агрессивного).

Здесь следует отметить, что нашей целью не является формализация задачи групповой фуражировки, так, как это было предложено в работе [Fedoseeva, 2015]. Мы рассматриваем один частный феномен – механизм самоорганизации группы агентов (аниматов) при решении задачи распределения кормовых участков. Но прежде сделаем небольшое отступление и рассмотрим одну из типичных оптимизационных задач.

#### **4.1.2. Оптимизационная задача размещения**

Рассмотрим следующую оптимизационную задачу, сводящуюся к распределению агентов по множеству участков. Эта задача напоминает описанные у Цетлина [Цетлин, 1969] игры автоматов в размещения, однако имеет менее формальный характер (более "приземлена") и ориентирована на практическую реализацию. Итак, пусть имеется некоторое множество участков и агентов, представленных следующим образом:

(1) Множество областей пространства (участков)  $S = \{s_i\}, i=1..m$

Каждая область  $s_i$  характеризуется неким весом  $\varphi_i$  и множеством воспринимаемых агентом признаков  $d_i$  этой области:

$$s_i = (\varphi_i, d_i) \quad (4.1)$$

(2) Множество агентов  $A = \{a_k\}, k=1..n$

Задача состоит в нахождении механизма периодического распределения  $D$  агентов по участкам таким образом, чтобы это распределение было равномерным. Распределение  $D$  – это подмножество отображения вида  $A \times S$ , т.е.  $D \subseteq A \times S$ .

При этом вводятся следующие условия и ограничения:

а) Распределение  $D$  должно обеспечивать максимизацию использования ресурсов

$$\sum_i \varphi_i \rightarrow \max_D \quad (4.2)$$

- б) Распределение агентов по участкам производится с некоторой периодичностью.  
 в) Время пребывания агентов на участках должно быть по возможности одинаковым.  
 г) Управление процессом распределения является децентрализованным.  
 д) Агенты не обладают полной информацией о распределении  $D$ , а могут лишь наблюдать состояние одного участка в текущий момент времени.

Рассмотрим вариант решения этой задачи, описав свойства, которыми должен обладать агент, а также модель его поведения.

Каждый агент характеризуется возрастом  $t_k$  и памятью  $m_k$ .

$$a_k = (t_k, m_k) \quad (4.3)$$

Значение  $t_k$  монотонно возрастает с течением времени. Память  $m_k$  – это множество образов наблюдаемых признаков  $Im$  и их вес  $\omega$  – некий параметр, который определяет степень знакомства анимата с наблюдаемым объектом или сценой.

$$m_k = \{Im_j^k, \omega_j^k\} \quad (4.4)$$

Далее мы будем опускать индекс агента  $k$  в тех случаях, когда его наличие будет очевидно.

Фактически,  $m$  – это базис некоторой функции узнавания  $R$  множества  $d_i$ . Функция узнавания в простейшем случае определяет расстояние между множеством наблюдаемых признаков и хранящимися образами областей  $Im$ :

$$R(d^r, m) = Id = \arg \min_j (|d^r - Im_j|), \quad (4.5)$$

$$Im_j \in m, \min_j (|d^r - Im_j|) \leq \varepsilon$$

Здесь  $\varepsilon$  – порог узнавания.

Формирование множества  $m$  осуществляется так:

Если  $\min(|d^r - Im_j|) > \varepsilon$ , то это означает, что наблюдается новый объект и его признаки  $d^r$  добавляются к множеству  $m$ , т.е. запоминаются. Если наблюдается уже знакомый объект, то вес образа  $\omega_{Id}$  увеличивается.

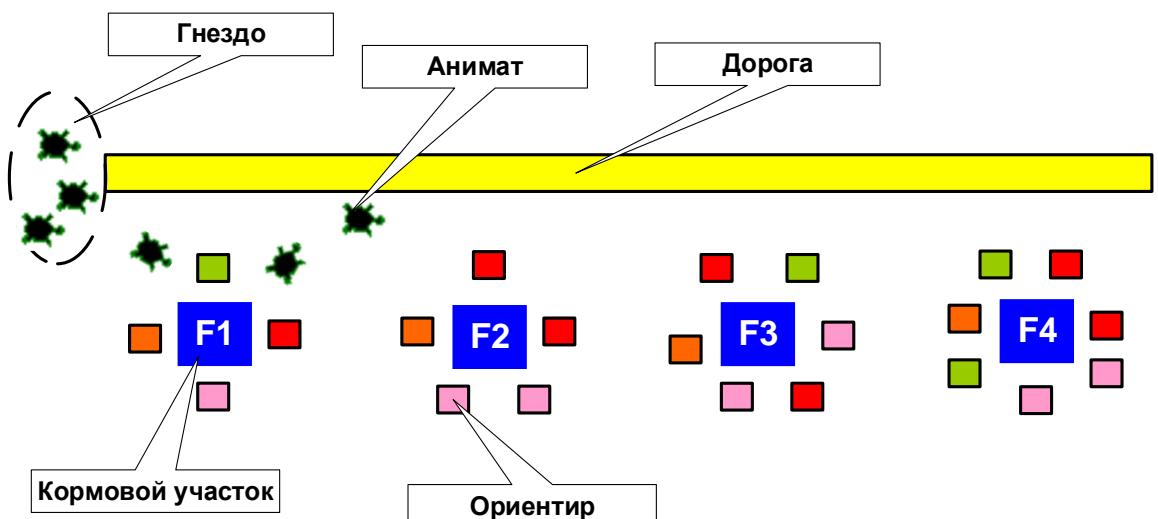
Функция узнавания  $R$  отображает множество наблюдаемых агентом признаков  $d^r$  в  $Id_i$  – внутреннее имя участка. Таким образом, для агента все области  $s_i$  идентифицируются только множеством  $d_i$  или его внутренним номером в памяти  $m$ .

Теперь мы приостановим описание решения. Дело в том, что сформулированная задача есть не что иное, как описание территориального компонента пищевого поведения

муравьев. Точнее, речь идет о реализации феномена профессиональной карьеры муравьев, о котором упоминалось выше. Рассмотрим, каким образом можно описать этот действительно интересный, нетривиальный и "разумный" карьерный процесс.

#### 4.1.3. Постановка содержательной задачи

Рассмотрим следующую модельную задачу. Пусть имеется гнездо как зона начального положения аниматов. От гнезда идет дорога, проходящая мимо ряда кормовых участков (точнее, в мирмекологии это называется ИПУ – индивидуальный поисковый участок). Каждый кормовой участок (ИПУ) окружен некоторым множеством ориентиров – объектов, регистрируемых сенсорной системой аниматов. На Рис. 4.1 приведен пример такого участка – зоны обитания аниматов.



*Рис. 4.1. Модельный полигон с кормовыми участками F1-F4*

Кормовые участки обозначены, как  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$  и  $F_4$ . В этом мире существуют следующие виды объектов: дорога, ориентиры, кормовые участки и особи-аниматы. Анимат-муравей снабжен множеством сенсоров, умеющих регистрировать расстояние до объектов и их характеристики (для наглядности – цвет). Сами аниматы имеют возможность генерировать некий сигнал, который может быть зарегистрирован другими участниками. Это – своего рода маяк, позволяющий определить состояние анимата, степень его "агрессивности". Причины возникновения агрессии и способы ее проявления мы подробно рассмотрели ранее, поэтому здесь будем говорить не о внутренних механизмах агрессии, а о результатах ее действия.

Задача заключается в реализации механизма распределения аниматов по территории таким образом, чтобы (а) обеспечивалось накопление опыта (знаний об окружающем мире) аниматов и (б) сохранялась устойчивость системы к внешним

возмущениям (естественная убыль участников процесса не нарушала бы единой схемы территориального распределения).

Перечень умений анимата весьма ограничен. Его деятельность складывается из следующих поведенческих процедур:

- (1) Поиск дороги.
- (2) Движение по дороге.
- (3) Поиск кормового участка.
- (4) Запоминание сцены.
- (5) Оценка ситуации.

Двигательные процедуры (1)-(3) реализуются естественным образом, с помощью, например, конечных автоматов. Интересно, что реализация функции запоминания, накопления опыта и узнавания участков является в данной схеме несущественной с точки зрения организации поведения. Одна из простейших реализаций механизма памяти выглядит следующим образом.

**Память и опыт.** Оказавшись на кормовом участке (для этого регистрируется цвет соответствующего поля) в момент времени  $t$ , анимат начинает циклический осмотр: регистрируется текущий угол поворота  $\alpha_i$  и определяется код объекта (цвет ориентира)  $O_j$ , попавшего в поле зрения анимата. Таким образом, получается описание текущей сцены следующего вида:

$$Sc(t)=\{(\alpha_i, \{O_j\})\}, \quad i=1..N_{step}, j=1..N_{det} \quad (4.6)$$

Здесь  $N_{step}$  – количество шагов поворота,  $N_{det}$  – количество распознаваемых объектов.

Если в общем случае сцена – это множество наблюдаемых объектов и отношений между ними, то здесь мы имеем дело с ее предельно упрощенным вариантом в виде упорядоченного списка элементов  $O_j$ . При этом угол поворота  $\alpha_i$  определяется некоторым шагом, который может быть и весьма большим. Например, в проведенных экспериментах достаточно было осуществлять поворот с шагом в 4 румба (4/32 окружности). Количество регистрируемых ориентиров (их видов или цветов) тоже ограничено.

Память анимата представляет собой список зарегистрированных к моменту времени  $t$  сцен  $Sc_i$  с соответствующими весами  $\omega_i$ :

$$M(t)=[(Sc_i, \omega_i)] \quad (4.7)$$

Сформировав текущую сцену в некоторый момент, анимат сопоставляет ее со списком уже имеющихся. Если обнаруживается похожая сцена, то текущая сцена считается знакомой. Анимат в этом случае увеличивает значение соответствующего веса

$\omega_i$ . Этот вес играет большую роль в поведении анимата, т.к. он характеризует степень знакомства анимата с этим участком, его опыт. Реализация процедуры сопоставления сцен определяется тем, каким образом регистрируются ориентиры: с использованием вероятностного аппарата, коэффициентов уверенности, двоичной логики и т.п. В любом случае можно использовать результат пересечения компонентов двух сцен – текущей  $Sc(t)$  и находящейся в списке  $Sc_i$ :

$$d(Sc(t), Sc_i) = \bigwedge_k Sc(t)^k, Sc_i^k \quad (4.8)$$

Итак, по мере появления на том или ином участке, анимат запоминает окружение (сцену), регистрируя при этом количество посещений этого участка (параметр  $\omega_i$ ).

**Конфликты.** Процедура оценки ситуации заключается в том, что анимат сравнивает уровень своей агрессивности с уровнем агрессивности соперника. Если соперник более агрессивен, то анимат покидает участок. Именно так ведут себя муравьи, способные распознать степень агрессивности друг друга (прежде всего по позе). Здесь же оставление участка заключается в том, что управление передается автомату, реализующему процедуру поиска дороги и т.д.

Уровень агрессивности определяется следующим соотношением:

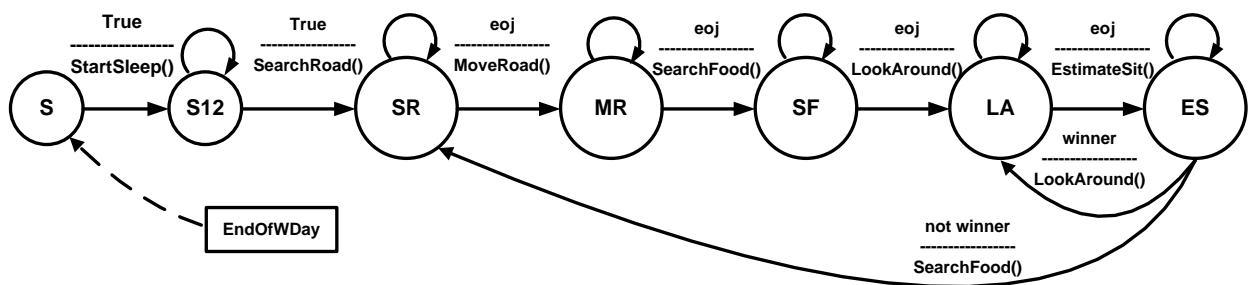
$$A(t) = k_1 Age(t) + k_2 \omega_t \quad (4.9)$$

Здесь  $Age(t)$  – возраст анимата (в некоторых единицах времени – циклах моделирования),  $\omega_t$  – вес текущей сцены (степень "знакомства" участка),  $k_1$ ,  $k_2$  – некоторые весовые коэффициенты. Таким образом, уровень агрессивности зависит от возраста (мирмекологи утверждают, что чем старше особь, тем она более агрессивна [Захаров, 1991]) и от того, насколько особь знакома с участком, т.е. считает его своим.

**Вопросы начального размещения.** С одной стороны, в муравьином семействе основной активной силой является опытный муравей-разведчик. Он исследует новые территории, он знаком с окружающей территорией, он даже переносит неопытных молодых особей, не способных к ориентации в новом для них пространстве [Длусский, 1967]. С другой стороны, по наблюдениям тех же биологов первыми на кормовые участки выходят молодые особи. Именно такой порядок выхода (сначала – молодые, затем – более опытные) был реализован в проведенных вычислительных экспериментах. С технической точки зрения такая стратегия удобна тем, что молодые особи, первыми приходя на ближайшие свободные участки, успевают запомнить их до того, когда придет более опытный индивид и прогонит молодого.

**Вычислительные эксперименты.** Был проведен ряд экспериментов по моделированию поведения группы аниматов на полигоне, представленном на Рис. 4.1. Для

этого использовалась система моделирования *KVORUM* ([Карпов, Ровбо, Овсянникова, 2018], [Rovbo, Ovsyannikova, 2017]), в которой каждый анимат снабжался множеством поведенческих автоматов. При этом общий управляющий алгоритм пищевого поведения, схема которого была приведена выше, был реализован мета-автоматом, задачей которого было активизировать частные поведенческие процедуры (автоматы) в зависимости от текущих условий и состояния системы. Схема мета-автомата (фактически, реализующего общую стратегию пищевого поведения), приведена на Рис. 4.2.



*Рис. 4.2. Мета-автомат, реализующий стратегию пищевого поведения*

Мета-автомат реализован как автомат Мили. Пометки на дугах интерпретируются как условие перехода (числитель) и выполняемая процедура (знаменатель). Условие *eoj* – это предикат, определяющий условие завершения автомата, реализующего соответствующую процедуру. Следует отметить, что переходы из состояния *ES* определяются результатами выполнения функции оценки *EstimateSit()*: если соперник слабее (менее агрессивен), то анимат остается на кормовом участке. Иначе – начинает искать дорогу, т.е. покидает участок. Автомат принудительно сбрасывается в начальное состояние при наступлении события "*EndOfDay*" (конец рабочего дня), возвращение в гнездо.

Типичная конфигурация предполагала, что кормовых участков меньше, чем имеется аниматов – претендентов. В данном случае – 5 аниматов и 4 участка  $F_1-F_4$ . Участок  $F_1$  – это ближайший гнезду. Все аниматы имели ограниченный срок жизни – 100 условных циклов (на один цикл – "год" – приходилось 5000 тактов модельного времени). Кроме того, у аниматов имелся разный начальный возраст: от 1 "года" (анимат *A-1*, самый молодой) до 40 "лет" (анимат *A-5*).

На Рис. 4.3 представлен жизненный путь анимата "среднего возраста". По оси абсцисс отложен возраст анимата (от 20 до 100), по оси ординат – количество посещений кормовых участков.

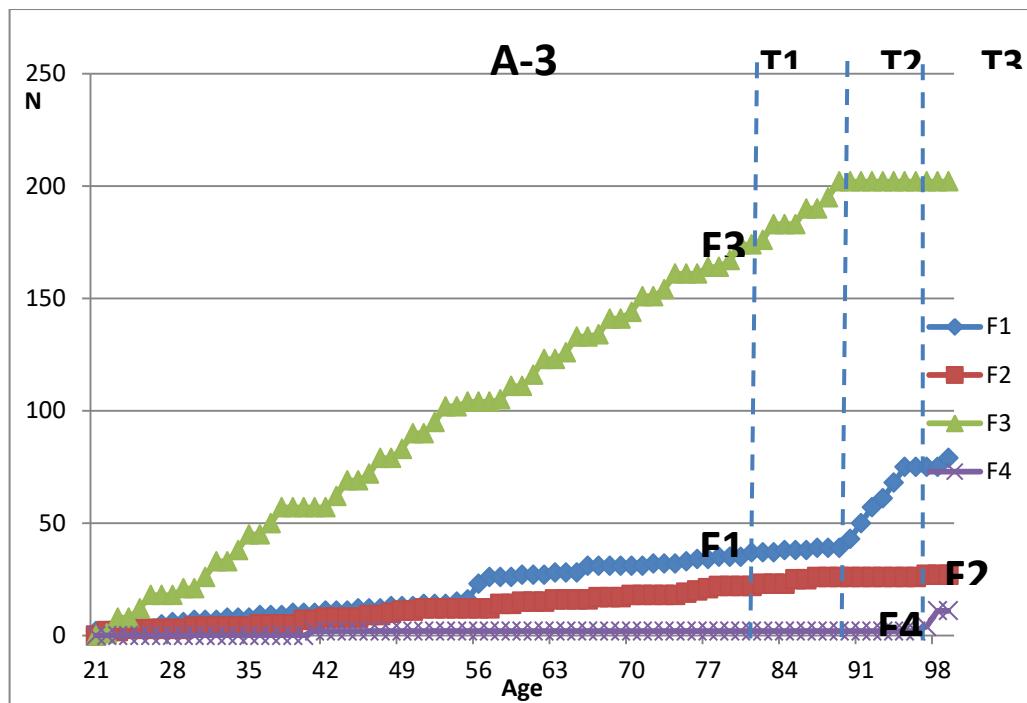


Рис. 4.3. Жизненный путь анимата "среднего возраста"

Как видно, основной кормовой участок для анимата-“середняка” – это участок  $F_3$ . На ближние участки  $F_1$  и  $F_2$  претендуют более опытные особи. Несмотря на то, что анимат посещает ближние участки первым (сначала выходят более молодые), он оттуда изгоняется. Характерными моментами в жизни анимата  $A-3$  являются точки  $T_1$ ,  $T_2$  и  $T_3$ . В момент времени  $T_1$  “умирает” самый старый анимат  $A-5$ , который занимал участок  $F_1$ . Начинается перераспределение участков, но анимат пока продолжает работать на своем участке (переходной процесс, ему мешает более старший коллега  $A-2$ ). Начиная с момента времени  $T_2$  анимат  $A-3$  начинает осваивать ближайший участок  $F_1$ , который освободил “умерший” к тому моменту времени анимат  $A-2$ . Точка  $T_3$  – это окончание устойчивого развития. К этому моменту разница в возрасте аниматов перестает играть значительную роль (как это было в начальный период), разница между уровнями агрессивности у соседей нивелируется (для анимата  $A-3$  участок  $F_1$  все-таки не самый знакомый).

Для наглядности ниже изображены графики распределения по территории для самого молодого (Рис. 4.4,а) и самого старшего (Рис. 4.4,б) аниматов.

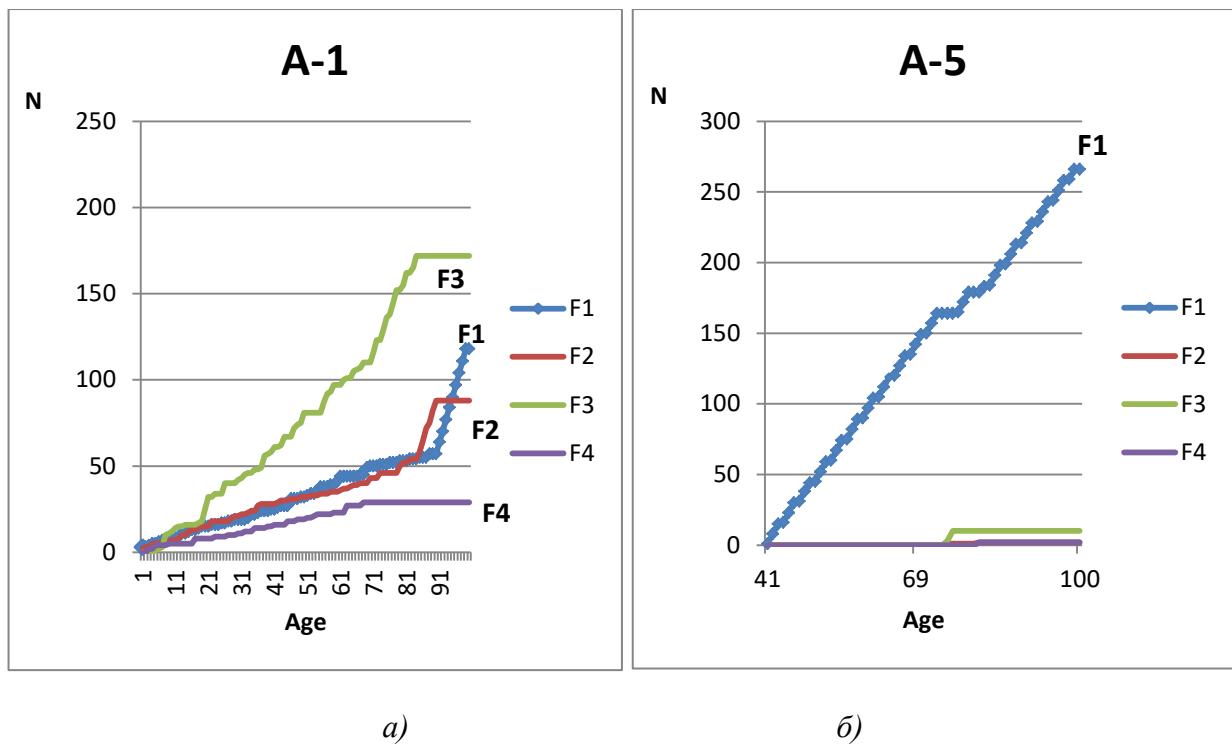


Рис. 4.4 "Жизненный путь" аниматов: а) молодая особь: возраст от 1 до 100 циклов, б) опытная особь: возраст от 40 до 100 циклов

Анимат *A-1* начинает осваивать участок *F<sub>1</sub>* лишь к концу своей жизни (вершина его профессиональной карьеры). Поведение же анимата *A-5* совсем просто – он постоянно пребывает на участке *F<sub>1</sub>*.

Различные аномалии, типа той, когда анимат *A-5* в возрасте 70 "лет" некоторое время поработал на участке *F<sub>3</sub>*, объясняются тем, что и сами сцены распознаются аниматами не всегда однозначно, и существуют помехи при самом движении. Например, если на пути анимата обнаруживается другой индивид, то срабатывает рефлекс обхода препятствия. Иногда это приводит к тому, что анимат теряет цель, пропускает кормовой участок или сходит с дороги, что соответствует и поведению муравья в естественных условиях.

### О сути задачи фуражировки

Сама по себе задача фуражировки, составной частью которого является этап распределения аниматов (роботов, агентов) по кормовым участкам (ИПУ), является весьма популярной в групповой робототехнике, см., например, [Labella, Dorigo, Deneubourg, 2006]. Действительно, это весьма наглядная задача, ориентированная на получение практически значимых результатов, см., например, [Siciliano, Khatib, 2016]. Однако, в основном, при ее решении авторы сосредотачиваются на реализации весьма

нетривиальных процедур – от схем разделения труда до совместного планирования распределения участков ([Zahadat, Schmickl, 2016]).

В отличие от таких подходов, описанная поисковая схема не требует привлечения никаких дополнительных, искусственных механизмов. Разумеется, ожидать оптимальности решения в такой схеме не приходится. Вопросы оптимальности размещения – это хорошо известная задача, решенная, к примеру, для игр автоматов при распределении ресурсов (кормушек) [Цетлин, 1969]. Здесь же основным вопросом было определение базовых механизмов, требуемых для получения такого наблюдаемого в природе феномена, как разведка и распределение муравьев по участкам. Оказывается, что такими механизмами является доминирование (как результат агрессивных действий) и память. Мы старались очень аккуратно обойти вопрос агрессии при описании фуражировки. Можно ли считать поведение аниматов при обнаружении претендента на участок агрессивным – это спорный вопрос. Генерация некоторого воспринимаемого и оцениваемого "соперником" сигнала может рассматриваться и как принятие "агрессивной" позы, и как некий суррогат процедуры нападения и пр. Более того, мы не можем назвать агрессивным такое действие, которое не приводит к некоторому ущербу другому индивиду, т.к. изгоняемый соперник никакого урона не несет (если не считать ущербом необходимость покинуть участок и уходить все дальше от гнезда). В этом смысле термин агрессия здесь употребляется условно, в метафоричном смысле. Некоторые иные аспекты агрессивного поведения обсуждаются в работе [Карпова, Карпов, 2018], однако там речь идет прежде всего о влиянии агрессивного поведения как фактора, определяющего эффективность распределения группы агентов на ограниченной территории.

## **4.2. Задача индивидуального патрулирования**

Пожалуй, более популярной по сравнению с задачей фуражировки является задача патрулирования. По крайней мере, считается, что задача патрулирования имеет явный практический аспект. Подробнее об этой задаче, включая определения, суть используемых методов и аналитический обзор, будет говориться в разделе, посвященном территориальному гомеостазу. Здесь же мы коснемся лишь одного ее аспекта – патрулирования как сугубо тестовой задачи.

Реализация процедуры патрулирования требует решения ряда частных задач – собственно движения по заданному маршруту, исследования территории (картографирования), элементов планирования, взаимодействия между патрульными (если речь идет о группе) и т.д. На этой задаче были отработаны и алгоритмы

картографирования (сбор информации с датчиков в распределенную базу данных), и методы локализации роботов на полигоне, и следование за лидером и т.д. Однако мы не будем приводить результаты этих исследований в силу того, что ничего нового, кроме апробации, это не дало. В данной постановке задачи патрулирование определялось одним достаточно примитивным и непоказательным мета-автоматом. Причиной такого положения дел является бесперспективность выделения подобного рода частных задач, таких, как патрулирование (бесперспективность с точки зрения изучения механизмов социального поведения как множества взаимосвязанных механизмов) Рассмотренная выше задача фуражировки с компонентом агрессии оказалась более интересной и показательной. Об этом тоже будет говориться в разделе "Территориальный гомеостаз". Единственным интересным результатом стала реализация процедуры планирования движения, основанной на методе динамических потенциальных полей.

**Метод динамических потенциальных полей.** Определение направления движения робота при решении задачи картографирования является многофакторной задачей и относится к категории механизмов планирования. Одним из весьма распространенных подходов к решению этой задачи является метод потенциального поля (см., например, [Shvets, 2015a], [Siciliano, Khatib, 2016]). Метод предполагает, что движение робота определяется действующими на него силами притяжения и отталкивания. Например, со стороны препятствий действуют силы отталкивания, а целевые точки задают силы притяжения. При этом формируется потенциальное поле сложной конфигурации, а робот движется по линии градиента в направлении минимума этого поля. Интересно, что природа этого поля не существенна. Например, в работе [Gayle, Moss, Lin, 2009] говорится о т.н. "социальных" полях, определяющих особенности социального взаимодействия агентов. Очевидным недостатком этого градиентного метода является опасность застревания робота в локальных экстремумах. Кроме того, при такой организации движения могут возникать циклические траектории движения.

Был предложен следующий метод планирования пути, который является разновидностью метода потенциалов [Karpov и др., 2016]. Пусть поле представлено совокупностью клеток  $N \times M$ :

$$F = (s_1, s_2, \dots, s_{N \times M}) \quad (4.10)$$

Каждой клетке (ячейке)  $s_i$  присваивается значение потенциала  $\varphi_i$ , которое определяет "притяжение" ("привлекательность") этой части пространства для робота. Отрицательные значения определяют степень притяжения, а положительные – степень "отталкивания". Направление движения в этом случае определяется направлением суммарного поля:

$$\overline{E} = - \sum_i^{N \times M} \overline{h}_i \quad (4.11)$$

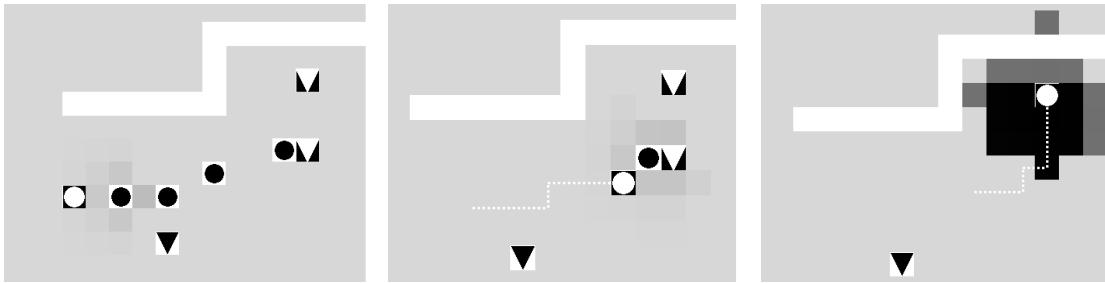
Здесь  $h_i$  – это производная величина от потенциала  $\varphi_i$ , которая в простейшем случае может быть определена таким образом:

$$|h_i| = \frac{\varphi_i}{r_{i,robot}^k} \quad (4.12)$$

Здесь  $r_{i, robot}$  – расстояние между роботом и ячейкой  $i$ .

Неисследованные области представлены ячейками с высокой притягательностью для робота. По мере исследования этих областей их потенциал уменьшается, теряя свою привлекательность. Сам же робот движется по направлению, определяемому минимальным суммарным потенциалом.

На Рис. 4.5 приведен фрагмент карты, содержащей препятствия и зоны с высоким и низким потенциалом. Последние заштрихованы более темным цветом. Это означает, что темные – с низким потенциалом – клетки являются притягательными для робота.



*Рис. 4.5. Фрагмент карты. ○ – робот, □ – препятствия, ▼ – ячейки с высоким потенциалом (отталкивают робота), ● и ▽ – ячейки с низким потенциалом (притягивают робота)*

Задача индивидуального картографирования может считаться выполненной, когда роботом исследован определенный процент областей – ячеек. Итоговая процедура объединения (слияния) карт вызывается после того, как закончены индивидуальные задачи картографирования. Для объединения карт все роботы образуют структуру, называемую статическим роем [Kagrov, Kagrova, 2015a]. Далее реализуется процесс взаимодействия роботов в статическом рое для обмена фрагментами карт, маршрутами и т.д. При этом, разумеется, предполагается, что роботы оснащены средствами локального взаимодействия (связями), которые были описаны выше.

**Устойчивость метода динамических потенциалов.** Классический метод потенциалов, относясь к категории градиентных, не гарантирует выход из зоны локального экстремума. Предложенный механизм несколько более устойчив в этом

отношении. Во время движения особь влияет на среду, изменяя потенциал ячеек. Механизмы этого изменения несущественны. Это может осуществляться либо запоминанием информации о пройденных маршрутах (в той или иной форме), либо оставлением феромонного следа. В любом случае, след (трек) при движении формирует зоны высокого потенциала, что приводит к тому, что повторение уже пройденного маршрута становится затруднительным (агент избегает области, которые уже посещал).

Разумеется, след, как зона высокого потенциала, может деградировать со временем. Ровно так, как это происходит с запаховыми или феромонными метками. В этом случае, естественно, особь уже может пройти по старому маршруту. И здесь "скорость выветривания" (выравнивания потенциала) будет оказывать определяющее влияние на цикличность движения индивида (агента).

Приведенные примеры демонстрируют, что ориентация на решение частных задач не приближает нас к пониманию того, в чем заключается конструктивная особенность механизмов социального поведения (МСП). Или как следует рассматривать эти механизмы с точки зрения решения прикладных задач. Далее будут обсуждены основы МСП как совокупности некоторого количества фундаментальных элементов или компонент.

## **4.3. Территориальный гомеостаз**

### **4.3.1. Вводные понятия**

В этом разделе будет рассмотрен вопрос существования обобщенной задачи, к решению которой может быть сведен ряд прикладных задач групповой робототехники, таких, как патрулирование, охрана территории, фуражировка и пр. Наличие обобщенной задачи позволяет разрешить не только проблему унификации моделей и методов, но и определить некий универсальный функциональный базис, основанный на механизмах социального поведения. В качестве такой задачи предлагается рассмотреть т.н. задачу территориального гомеостаза.

#### **Гомеостаз**

Исходно понятие гомеостаза (гомеостазис, homeostasis) было введено физиологом У. Кенном (Walter Cannon) [Cannon, 1932] и обозначало относительное динамическое постоянство состава и свойств внутренней среды, а также устойчивость основных физиологических функций организма. Важно, что понятие гомеостаза применимо также к сообществам организмов. В этом случае гомеостаз сводится к сохранению постоянства видового состава и числа особей в биоценозах [Кассиль, Гинтер, 1978]. Механизмы

гомеостаза популяций могут быть самыми разнообразными. Например, у растений при излишне большой плотности всходов начинает проявляться эффект самоизреживания (путем уменьшения всхожести, изменения вегетативной мощности и т.п.). У животных жесткие формы регуляции плотности популяций проявляются в уничтожении конкурентов и, реже, – в каннибализме. Более того, существуют виды, у которых способность к умерщвлению конкурентов внутри популяции закрепляется эволюционно в их поведении и даже морфологии. Подобные примеры встречаются среди насекомых [Чернова, Былова, 2004].

Нас интересует, прежде всего, гомеостаз популяций именно с точки зрения территориального поведения животных. Считается, что территориальное поведение животных, как система инстинктов, в основном направлено на сдерживание роста численности популяции на данной площади. Основными механизмами такого поведения является мечение и охрана участков; выселение, как реакция на рост численности популяции, и пр. Внутренние механизмы, включающие те или иные реакции территориального поведения, достаточно хорошо изучены. Например, стресс в условиях перенаселения изменяет активность гипоталамуса, что приводит к изменению гормонального равновесия организма со всеми вытекающими последствиями (угасание инстинктов заботы о потомстве, повышение агрессивности, снижение устойчивости к вредным воздействиям и т.д.). Интересно, что стресс-реакции по-разному проявляют себя в сообществах с иерархической организацией: у доминирующих особей стресс проявляется гораздо слабее, нежели у подчиненных [Чернова, Былова, 2004].

Итак, в любом случае гомеостаз популяции в животном мире – это проявление механизмов ограничения роста численности популяций. В этом смысле популяционный гомеостаз является более узким понятием, нежели гомеостаз как таковой, обозначающий поддержание постоянства в широком смысле (численности, состава, свойств среды, состояния и т.п.).

Вернемся, однако, к практическому аспекту исследования – групповой робототехнике. Естественно, что нас интересует решение вполне конкретных, прикладных задач. Само по себе поддержание целостности популяции агентов (аниматов, роботов) в определенных рамках является достаточно ограниченной, частной задачей. Предполагается, что группировка роботов должна решать такие задачи, как патрулирование, эскортирование, охрана, мониторинг и разведка территории, обеспечение условий автономного существования в течение продолжительного периода времени, целенаправленное изменение структуры и параметров среды обитания и др. Исходя из

этого, представляется целесообразным введение более общего понятия, объединяющего ряд задач, феноменов и явлений – т.н. *территориальный гомеостаз*.

### **Территориальный гомеостаз**

Территориальный гомеостаз является понятием, определяющим ряд специфических особенностей системы "группа роботов – среда". Основными проявлениями территориального гомеостаза, обеспечивающего устойчивое функционирование группы роботов (агентов, аниматов) на ограниченной территории являются:

1. Наличие знаний о состоянии территории обитания.
2. Способность агентов к поведению, связанному с обеспечением собственной безопасности.
3. Способность агентов к поддержанию своей энергетической автономности.
4. Распознавание опасных (представляющих угрозу) факторов.
5. Способность группы агентов к активному противодействию угрозам.

Будем полагать, что основной целевой функцией группы роботов (аниматов) является поддержание территориального гомеостаза как постоянства состава группы и территории. Для природных социумов говорить непосредственно о целевой функции лишено смысла, однако некоторые аналогии провести можно. Например, в работах этологов утверждается, что основные задачи социума муравьев – это самосохранение в годичном цикле и расширенное воспроизведение населения, обеспечивающее развитие социума в многолетней перспективе [Захаров, Захаров, 2013]. В некотором смысле можно говорить о том, что понятие территориального гомеостаза определяет механизмы, необходимые для поддержания равновесного состояния группы.

Здесь крайне важно отметить, что такие классические задачи групповой робототехники, как, например, уже упомянутые патрулирование, мониторинг, разведка и эскортирование могут рассматриваться как частные проявления этого более общего понятия. Рассмотрим далее, как упомянутые прикладные задачи могут быть рассмотрены с точки зрения территориального гомеостаза.

#### **4.3.2. Патрулирование**

Согласно энциклопедическому определению, патрулирование – это "способ прикрытия (наблюдения, обороны, охранения) определённого района местности, части воздушного или водного пространства патрулями или дозорными [...], периодически

совершающими обход (объезд, облёт, плавание) в назначенных районах или на определённых маршрутах" [БСЭ, 1978а]. При этом чаще всего предполагают, что патрулирование осуществляется группой лиц.

Обзор многочисленных исследований в области решения задачи патрулирования применительно к задачам робототехники позволяет сделать следующие обобщения.

### **Постановка задачи**

Патрулирование может быть сведено к следующим постановкам задач.

1. Движение по заданной области пространства. Под задачей патрулирования понимается акт перемещения агента по заданной площади за регулярные интервалы в целях защиты или наблюдения. Обычно выполняется многочисленной группой роботов для повышения эффективности системы ([Portugal, Rocha, 2011], [Chevaleyre, 2004], [Espina и др., 2011], [Sempe, Drogoul, 2003], [Agmon и др., 2009], [Agmon, 2010]).

2. Движение по заданной траектории или обход заданных точек. Патрулирование рассматривается как задача прохождения по замкнутой траектории группой роботов [Marino и др., 2009] или как посещение заданных точек с определенной частотой (точки находятся или на выделенной площади, или на линии). [Elmaliach, Shiloni, Kaminka, 2008].

3. Топологический подход. В нем патрулирование рассматривается как задача прохождения по вершинам графа, которые обладают различным весом ([Portugal, Rocha, 2016], [Marier, Besse, Chaib-Draa, 2010], [Yanovski, Wagner, Bruckstein, 2003], [Basilico и др., 2010], [Portugal, Rocha, 2010], [Yin и др., 2012], [Hernández, Barrientos, Cerro, 2014], [Pasqualetti, Franchi, Bullo, 2012], [Machado и др., 2002]). Здесь надо подчеркнуть, что само по себе графовое представление самых разнообразных задач – это крайне распространенный метод решения, однако в данном случае речь идет не о модели как таковой, а о постановке задачи. Во главу угла здесь ставятся задачи, связанные с условиями неточности информации о состоянии графа, с обходом ребер графа с приблизительно одинаковой частотой (см., например, [Yanovski, Wagner, Bruckstein, 2003]) и т.п.

4. Патрулирование как задача мониторинга. Сводится, например, к наблюдению за периметром и контролю каждого его отрезка. Задачей может являться максимизация защищенности самого слабого места периметра [Agmon, Kaminka, Kraus, 2011], [Espina и др., 2011] или постоянное (неоднократное) посещение желаемого места с целью оценки его состояния ([Almeida, 2004], [Portugal, Rocha, 2013], [Agmon, Kraus, Kaminka, 2008], [Elmaliach, Agmon, Kaminka, 2009]).

5. Патрулирование, как задача взаимодействия с противником. Чаще всего речь идет о наличии противника, обладающего идеальной информацией (противнику известны все текущие позиции патрульных и их алгоритмы действия). Задачей патрульных является не допустить проникновения противника (или заметить его вторжение) на цели разного приоритета или минимизировать урон ([Basilico, Gatti, Amigoni, 2009], [Basilico и др., 2009], [Agmon, Kaminka, Kraus, 2011], [Espina и др., 2011], [Sless, Agmon, Kraus, 2014]). Иногда патрулирование рассматривается как состязательная игра, требующая выработки оптимальных стратегий поведения [Vorobeychik, An, Tambe, 2012].

6. Патрулирование как задача покрытия территории группой агентов. Речь идет о задаче обеспечения регулярного посещения доступных мест или равномерной частоты покрытия заданной области и обнаружения нарушителей группой агентов ([Shvets, 2015b], [Chu и др., 2007]).

### **Механизмы патрулирования**

Рассмотрим далее, что должен уметь робот (группа роботов или агентов) для осуществления патрулирования. Исходя из вышеупомянутых вариантов понимания патрулирования, можно выделить следующие задачи:

1. Отработка траекторий. Следование робота или группы роботов по заданной траектории [Marino и др., 2009].
2. Планирование движения. Решение оптимизационных задач планирования маршрута (на графах, в непрерывной области, траектории и т.п.) [Sless, Agmon, Kraus, 2014].
3. Мониторинг области пространства [Almeida, 2004].
4. Поиск нарушителей охраняемой зоны [Sempe, Drogoul, 2003].
5. Совершение некоторых работ в патрулируемой области (например, в работе [Sempe, Drogoul, 2003] это сборка мусора).
6. Решение задачи координированного процесса принятия решений группой роботов для увеличения производительности (эффективности) группы [Portugal, Rocha, 2011].
7. Планирование поведения с целью максимизации защищенности охраняемой территории ([Agmon, Kaminka, Kraus, 2011], [Espina и др., 2011], [Sless, Agmon, Kraus, 2014], [Vorobeychik, An, Tambe, 2012]). Сюда же относятся задачи обучения и принятия решений относительно стратегии поведения. Например, использование вероятностных стратегий коллективного патрулирования

совместно с адаптивным обучением (Bayesian decision rules, Bayesian decision making), [Portugal, Rocha, 2016].

8. Способность к обмену информацией между роботами в процессе патрулирования [Portugal, Rocha, 2016].
9. Собственно вопросы взаимодействия с противником (нарушителем). Опционально.

На самом деле приведенный перечень представляет собой "смешение жанров". В нем имеются и те механизмы, которые можно назвать базовыми, и производные, высокоуровневые. О более корректном представлении задач будет сказано ниже.

#### **4.3.3. Задачи конвоирования и эскортирования**

##### **Конвоирование**

Одной из задач, относящихся к категории морфологии группы и согласованного движения, является задача конвоирования. Обычно под конвоированием понимается согласованное движение группы роботов, образующих строй типа “конвой”. При этом чаще всего речь идет о смене дислокации группы роботов, при которой имеется некий ведущий робот и множество ведомых, которые должны отслеживать положение ведущего и отрабатывать траектории движения. Основная нагрузка по определению маршрута движения ложится на ведущего (конвоируемого), см., например, [Зенкевич, Чжу, 2017].

Центр тяжести исследований в этой области исторически приходится, прежде всего, на сенсорику роботов (как ведущих, так и ведомых). При этом особое внимание уделяется обработке видеинформации [Chiem, Cervera, 2004]. С другой стороны, основным подходом к решению вопроса поведенческой составляющей задачи конвоирования считается исследование правил локального взаимодействия [Yazbeck, Scheuer, Charpillet, 2014].

##### **Эскортирование**

Более общей по сравнению с конвоированием является задача эскортирования. Сам термин эскорт означает сопровождение любого вида [БСЭ, 1978б]. Зачастую задача эскортирования сводится, фактически, к конвоированию. Например, в работе [Batista и др., 2013] задача эскортирования понимается как движение группы роботов в динамической среде, при которой роботы должны сопровождать агента-цель, сохраняя безопасную дистанцию от цели. Такое же видение задачи эскортирования имеется и в работе [Matveev и др., 2015].

В силу большей общности по сравнению с задачей конвоирования, эскортирование подразумевает не только сопровождение как таковое, но и активное и целенаправленное взаимодействие с сопровождаемым объектом и с внешними факторами среды (угрожающими, противодействующими).

Перечень задач эскортирования, таким образом, выглядит следующим образом:

1. Задание маршрута движения с учетом активных и пассивных факторов внешней среды.
2. Собственно сопровождение эскортируемого (отработка траектории движения, распознавание и прогнозирование местоположения).
3. Распознавание ситуации (определение угрожающих или противодействующих факторов).
4. Оказание воздействия на те или иные угрозы, например, на противника в условиях противодействия или препятствия, помехи.

#### **4.3.4. Механизмы территориального гомеостаза**

Итак, можно сделать вывод, что патрулирование, эскортирование, рекогносцировка и пр., – все это может рассматриваться как интерпретация неких поведенческих компонентов. Т.е. мы выделяем некоторые реакции, акцентируем внимание (или определяем важность) на том или ином интересующем нас поведении или его аспектах. Отсюда возникает специфика задач управления поведением социума с точки зрения внешней прагматики или решения прикладных задач.

Вернемся к задаче поддержания территориального гомеостаза (ТГ). Будем исходить из того, что, во-первых, ТГ сводится к поддержанию постоянства состава группы и территории и, во-вторых, реализация механизмов ТГ является обобщением задач патрулирования, эскортирования и мониторинга. Иногда вводится задача охраны территории, однако в определенном смысле она сводима к патрулированию и мониторингу. Изобразим схематически компоненты задач ТГ так, как показано на Рис. 4.6.



*Рис. 4.6. Компоненты задач патрулирования, эскортирования и мониторинга как составные части территориального гомеостаза*

Как видно, ряд компонентов является общим для всех них. Сведем механизмы, необходимые для решения задачи поддержания ТГ, в единую схему, выделяя задачи индивидуального и группового уровней, и сформируем перечень поведенческих процедур. Условно задачи ТГ приведены на Рис. 4.7.

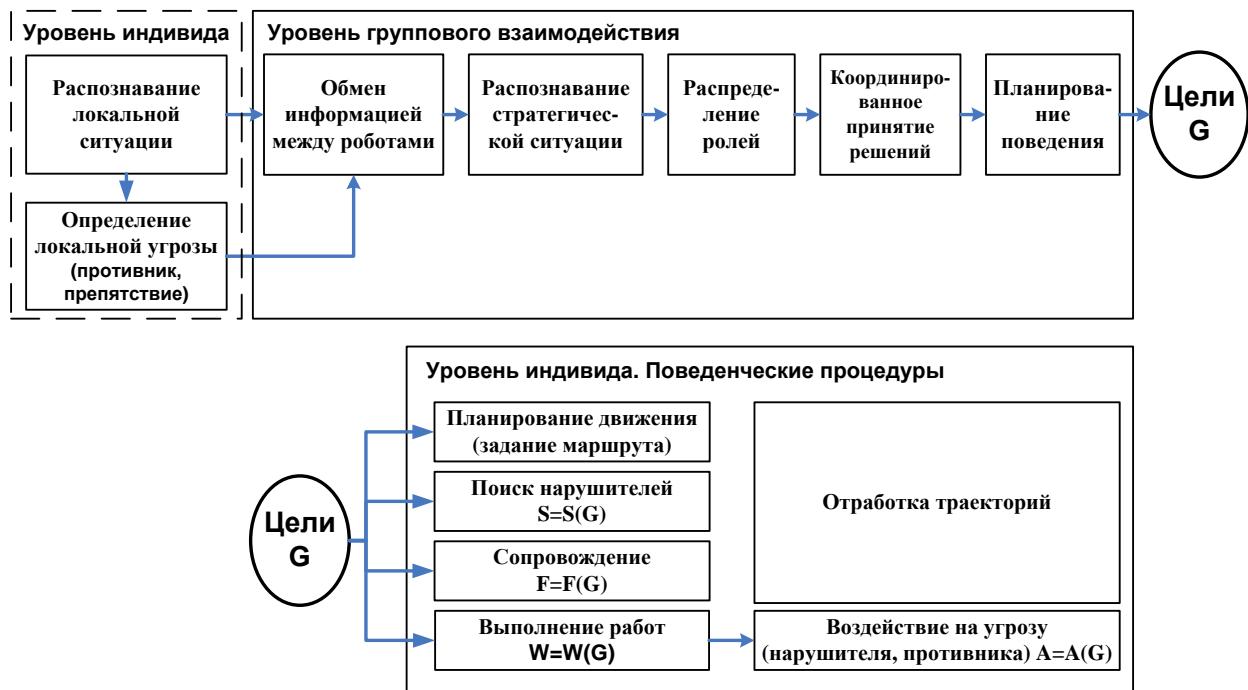


Рис. 4.7. Задачи и механизмы реализации территориального гомеостаза

Множество целей  $G$  – это множество целевых ситуаций, возможно, представленных в виде временного ряда.

На самом деле, здесь мы имеем дело лишь с некоторой упорядоченностью известных и достаточно успешно решаемых по-отдельности задач групповой робототехники. Основным вопросом является обобщение этих задач, представление их в виде единой поведенческой схемы.

### Потребности, цели и мотивация

Термины "потребности" и "цели" активно употреблялись в этой работе ранее. При этом подразумевалась, что имеется их понимание как минимум на интуитивном уровне. Сейчас, однако, переходя к попыткам формализации общей модели поведения, необходимо некоторое упорядочивание всей этой терминологии. Ниже мы будем говорить об этих понятиях, опираясь, для определенности, на школу А.Н. Леонтьева. Рассмотрим систему вида "вход-преобразование-выход".

**Вход. Потребности.** О потребностях уже говорилось: "*Потребность есть состояние организма, выражющее его объективную нужду в дополнении, которое лежит вне его*". Здесь и далее мы будем ссылаться на работу Леонтьева [Леонтьев, 1971]. Эта сущность достаточно явно представима в системе управления анимата в силу ее принадлежности нижнему "физиологическому" уровню. Для нас потребность – это входная величина.

**Выход. Цель.** Образно говоря, на верхнем уровне управления находится цель. Цель – это субъективный образ конечного результата, определяющий поведение агента. Согласно Леонтьеву "Цель – это представленный заранее результат, к которому стремится мое действие".

**Элементы преобразования вход-выход. Мотивация.** Согласно Леонтьеву, мотив – это "определенная" потребность. Основная функция мотивации – это побуждение к действию. Правда, Леонтьев пишет, что "*мотивы имеют еще и вторую функцию – функцию смыслообразования*", однако этот вопрос выходит за рамки данного исследования.

Итак, мотивация определяет деятельность. И именно здесь проявляется роль эмоций. Эмоции по Леонтьеву включаются наряду с другими факторами в число так называемых "мотивационных переменных". При этом сами эмоции не являются мотивами. "*Эмоции выполняют роль внутренних сигналов. [...] Они непосредственно отражают отношения между мотивами и реализацией отвечающей этим мотивам деятельности*".

Условно соотношения между рассмотренными сущностями изображены на Рис. 4.8.

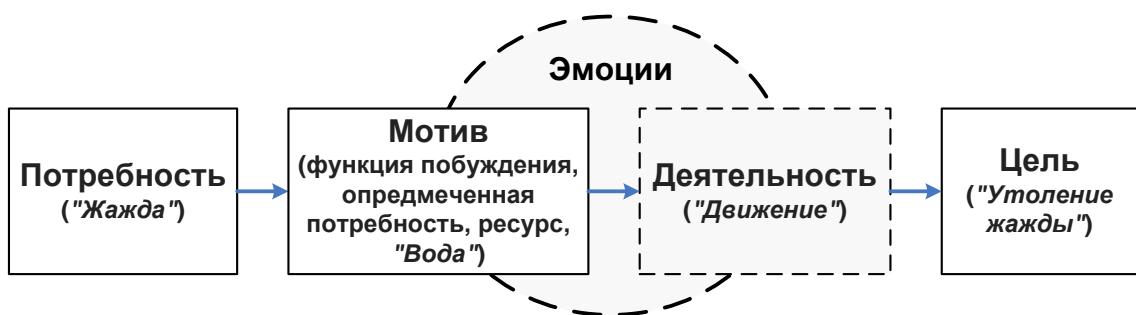


Рис. 4.8. Потребности, мотивы и цели

Отметим здесь, что и в этой схеме, и в схеме системы управления, рассмотренной в рамках эмоционально-потребностной архитектуры, роль эмоций является регулятивной.

Мы не будем останавливаться на вопросе целеполагания, как одной из основных функций сознающего субъекта. Согласно [Осипов и др., 2018] характер процесса целеполагания определяется типом картины мира субъекта, однако рассмотрение вопросов устройства картины мира анимата выходит за рамки данного исследования. Основным нашим вопросом является именно деятельность как таковая. Здесь мы придерживаемся позиции Н. Бернштейна: "*В процессе эволюции соматической системы ... определяющим звеном являются эффекторные функции. Судьбу индивидуума в борьбе за существование решают его действия – большая или меньшая степень их адекватности во все усложняющемся процессе приспособления*" [Бернштейн, 1990].

## Формализация поведения

Выше уже много говорилось о понимании термина "поведение". С конструктивной точки зрения мы рассматриваем его, как синоним ФКД – фиксированного комплекса действий. Это ближе к позиции М. Цетлина, который говорил о том, что любое достаточно сложное поведение слагается из совокупности простых поведенческих актов [Цетлин, 1969]. И это более конкретно, чем определение поведения как способности животных изменять свои действия под влиянием внутренних и внешних факторов [Гиляров, 1989].

Итак, поведение – это комплекс действий, воздействующий, прежде всего, на окружающую среду. Определимся далее с формализацией базовых элементов поведения – действиями.

### Действия

Можно выделить два основных подхода к определению совершаемых агентом действий.

1. Макроуровень. Этот подход описан, например, в работах [Кулинич, 2018] и [Карпов, Карпова, Кулинич, 2019], где совершаемые агентом действия определяют динамику изменения состояния среды функционирования. Эта динамика заключается в изменении агентами своих свойств и представляется как отображение:

$$W: Y(t) \rightarrow Y(t+1), \quad (4.13)$$

где

$W$  – система правил, заданных на множестве всех возможных состояний среды  $W: \times_i Z_i \rightarrow \times_i Z_i$ ;  $Y(t)$ . Здесь предполагается, что для каждого свойства каждого из  $n$  объектов (агентов) этой среды определено упорядоченное множество их возможных значений,  $Z = \{Z_i\}$ ,  $Z_i = \{z_{i1}, \dots, z_{iq}\}$ ,  $q = 1 \dots n$ .

$Y(t+1)$  – вектор значений всех свойств – состояние среды функционирования в момент времени  $(t+1)$ . Вектор  $Y(t)$  определяет значения свойств всех агентов  $Y(t) = (z_{1j}, \dots, z_{nb})$ .

2. Микроуровень. Это – определение действий агента в форме классических продуктов (см., например, [Осипов и др., 2018]). Здесь действие  $r$  представляется в виде правила – упорядоченной тройки вида

$$r = \langle Con, Add, Del \rangle, \quad (4.14)$$

где  $Con$  – условие правила,  $Add$  – множество добавляемых фактов,  $Del$  – множество удаляемых фактов.

Основная сложность использования модели макроуровня (4.13) заключается в ее излишней абстрактности и глобальности. Совершаемые агентом действия нас интересуют с точки зрения оказания влияния на ограниченное множество параметров среды, которое мы назовем множеством существенных параметров для некоторого действия.

С другой стороны, продукционная модель (4.14), требующая для каждого действия задания множества изменяемых параметров, является излишне подробной, превращая формализацию сколько-нибудь сложного поведения в крайне объемную и сложную для верификации конструкцию.

### Уровень поведения

Рассмотрим следующую схему рассуждений. Вернемся к пониманию моделей поведения (прежде всего – социального), как к некоторому множеству наблюдаемых феноменов, которые мы условно определяем как контагиозное, агрессивное, подражательное и др. поведение. Для реализации этих феноменов поведения необходимы базовые элементы – механизмы (модели, методы), описанные в первой главе, Рис. 1.9.

Например, для реализации феномена когезии от анимата требуется умение распознавать родственных особей, а также реализация целенаправленного перемещения и ориентации в пространстве. Условно это можно записать так:

$$\text{Когезия} = \text{узнавание} \otimes \text{движение} \otimes \text{ориентация}.$$

Здесь  $\otimes$  – некоторая операция композиции. Если термины "движение" и "ориентация" интуитивно понятны, то под узнаванием мы будем понимать здесь формирование некоторого устойчивого образа. Не следует путать это с распознаванием или идентификацией. Последнее означает, с точки зрения семиотики, определение имени сформированного образа.

Более строго, некоторый феномен поведения  $P$  определяется как функция или оператор, зависящий от внутреннего состояния анимата  $E_{int}$ , состояния внешней среды  $E_{ext}$  и множества его умений – процедур, реализующих те или иные действия  $A$ :

$$P = P(A, E_{int}, E_{ext}) \quad (4.15)$$

Здесь эффект межагентного (социального) взаимодействия осуществляется за счет оказания воздействий на окружающую и внутреннюю среду – эффекты явной и неявной коммуникации. Тем не менее, вместо выражения (4.15) будем для наглядности использовать более упрощенную – списковую – форму. В итоге мы получаем следующий перечень:

Табл. 4.1. Механизмы социального поведения и их реализации

	<b>Механизм/поведение</b>	<b>Составные части</b>
1.	Движение	Воздействие
2.	Когезия	Узнавание Движение Ориентация
3.	Контагиозное поведение	Эмоции Сигнальная коммуникация
4.	Агрессия	Идентификация Оказание воздействия Эмоции
5.	Подражательное поведение	С.Я Идентификация Узнавание
6.	Эмпатия (отзывчивость на эмоциональное состояние другого)	Идентификация Картина мира Контагиозное поведение Эмоции
7.	Картина мира	Модель мира С.Я
8.	Доминирование	Агрессия Идентификация
9.	Поиск	Узнавание Движение Ориентация
10.	Ориентация	Идентификация Модель мира
11.	Идентификация	Узнавание Сопоставление

Здесь С.Я. – субъективное Я (субъект поведения). Изобразим частично содержимое Табл. 4.1 так, как показано на Рис. 4.9.

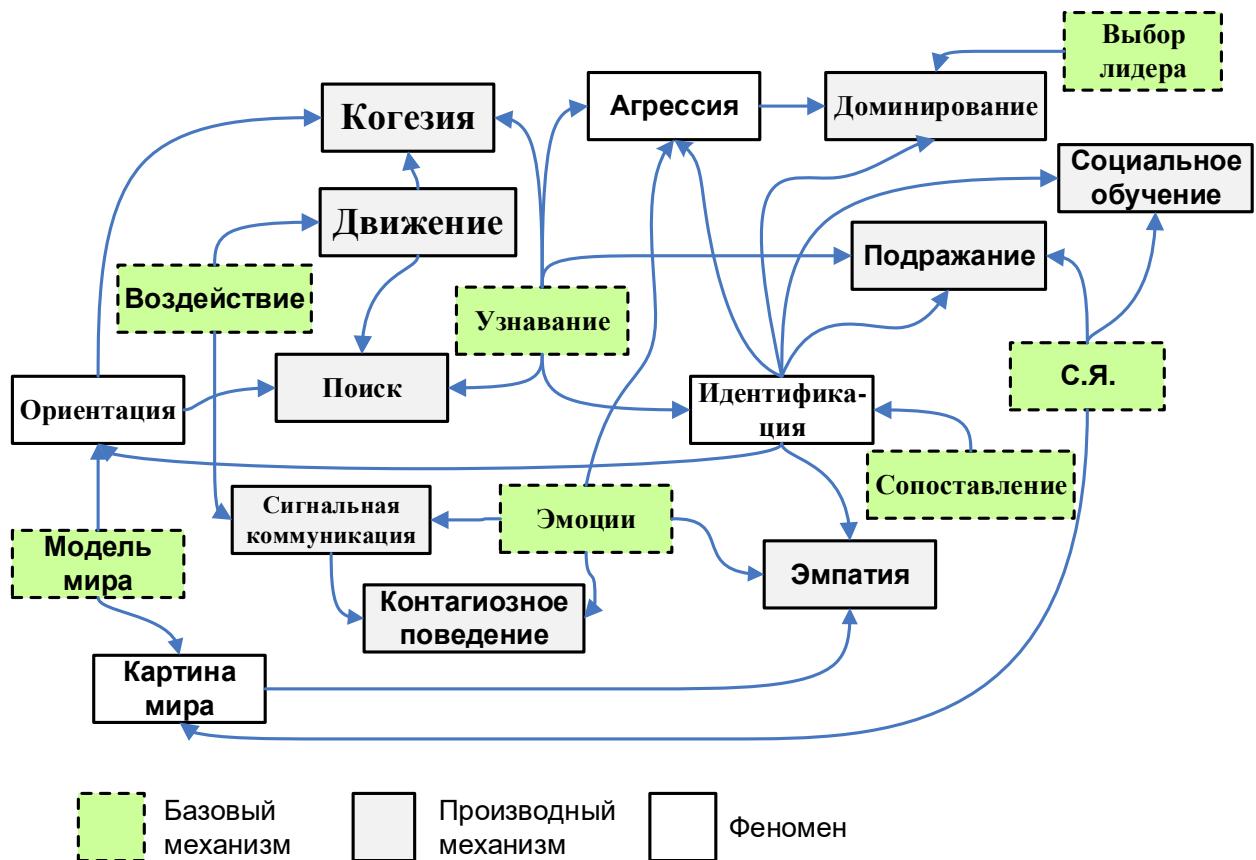


Рис. 4.9. Механизмы социального поведения и их базис – элементы, не имеющие входов

При этом не будем обращать внимание на наличие избыточных "транзитивных" связей. Здесь важно, что базовыми являются такие механизмы и сущности, как: *воздействие, узнавание, сопоставление, С.Я., модель мира, эмоции*.

### Обобщенная поведенческая модель

Обобщенная поведенческая модель анимата может быть представлена в виде некоторой семиотической сети. Например, в понимании семиотической модели поля знаний [Гаврилова, Хорошевский, 2000] (но никак не в виде формального определения семиотической системы, приведенного, например, в [Осипов и др., 2018]). О значимости именно поведенческого аспекта мы уже говорили выше ("... *Определяющим звеном являются <...> эффекторные функции. Судьбу индивидуума решают его действия*").

Введем основные компоненты модели:

(1)  $Z$  – структура-носитель, конечное множество функциональных элементов  $Q$  и связей между ними  $L$ . Элементы структуры  $Q$  являются сущностями, которые характеризуются своими уровнями возбуждения или активности. Связи между элементами определяют характер распространения сигналов. Фактически,  $Z$  – это некий аналог сети нейроподобных элементов.

Ряд элементов множества  $Q$  интерпретируется следующим образом:

(2)  $N$  – множество потребностей,  $N \subseteq Q$

(3)  $S$  – элементы сенсорной системы,  $S \subseteq Q$

(4)  $A$  – множество поведенческих программ (ФКД),  $A = \{A_i\}$ ,  $A_i \subseteq Q$

Более строго,  $A$  – это множество элементов, условно выделяемых как те, которые ответственны за тот или иной набор действий (реализацию центральных моторных программ или ФКД).

С операциональной точки зрения важными являются следующие понятия:

(5)  $M$  – память анимата, подмножество элементов структуры  $M \subseteq Z$ .

На самом деле, все элементы структуры  $Z$  мы можем рассматривать как элементы памяти, поскольку все они так или иначе участвуют в сохранении и воспроизведении знаний и навыков, что бы под этим ни понималось. Однако такой подход не совсем конструктивен. С pragматической точки зрения для анимата, который не претендует на роль носителя высших психических функций и развитых когнитивных способностей, удобнее упрощенное определение памяти  $M$  как структуры, ответственной за хранение эмпирических закономерностей, априорных или приобретенных.

Элементы множества  $M$  могут иметь различную интерпретацию. Среди них можно выделить носителей представления образов  $M_{img}$ , имен этих образов  $M_{name}$  и пр. Кроме того, структурно  $M$  можно рассматривать с точки зрения представления знаков.

(6) Эмоциональное состояние  $E: E \subseteq Q$

Это множество наблюдаемых элементов, участвующих в эмоциональной регуляции поведения агента.

(7)  $W(t)$  – текущее состояние агента. Это композиция состояний элементов  $Z$  – потребностей, активности и эмоций в некоторый момент времени  $t$ :

$$W = W(N, A, E)$$

В дискретном варианте  $W$  – это подмножество отображения вида

$$W \subset N \times A \times E$$

Формально  $W$  можно рассматривать, как состояние множества  $Q$ , однако здесь нас интересуют именно конкретные активные элементы из множеств  $N, A, E$ . Состояние элементов памяти  $M$  для нас не существенны. Это обусловлено, во-первых, желанием наличия хоть какой-то конкретики рассуждений, а во-вторых, тем, что наши рассуждения о поведении анимата используют именно понятия текущих потребностей, активности и эмоционального состояния (как регулятива поведения).

Здесь важно, что в состояние агента не входят элементы сенсорной системы  $S$ .

(8)  $G$  – целевая функция агента (субъективный образ конечного результата),  $G \subseteq Q$ .

Цель поведения анимата заключается в удовлетворении его потребностей. Это означает, что существует некоторое подмножество элементов из  $Q$ , которые связаны с достижением потребностей.

$$G = Q_N \subseteq Q$$

Таким образом, цель  $G$  – это множество элементов  $Q_N$ , находящихся в некотором требуемом состоянии, а само поведение анимата заключается в том, чтобы перевести элементы множества  $Q_N$  в определенные состояния  $Q^G_N$ .

Трактовка целенаправленного поведения может быть, например, такой: поведение должно минимизировать рассогласование между  $Q_N(t)$  и  $Q^G_N$ .

$$d = |Q_N(t) - Q^G_N| \rightarrow \min$$

При этом основная поведенческая цель – удовлетворение потребностей – может быть реализована с помощью механизма управления приоритетами целей, т.е. неким аналогом управляемой очереди. При такой организации достижение некоторой глобальной, "верхнеуровневой" цели может "перебиваться" возникающими текущими потребностями с более высоким "приоритетом". В простейшем случае  $G \subset N$ .

Такой подход не противоречит пониманию цели как некоторого субъективного образа конечного результата и связи понятия цели с мотивацией (см. выше).

**Функциональная форма.** Введенные компоненты и понятия позволяют теперь определить элементы и механизмы социального поведения в функциональной форме. Сведем это к таблице.

Табл. 4.2. Функциональное представление механизмов социального поведения

	<b>Механизм</b>	<b>Описание</b>
<b>Базовые механизмы</b>		
1.	Воздействие*	$\Psi_{inf} = \Psi_{inf}(S, A)$
2.	Узнавание	$\Psi_{rec} = \Psi_{rec}(S, M) \rightarrow M_{img}$ $M_{img} \subseteq M$
3.	Сопоставление	$\Psi_{comp} = \Psi_{comp}(M_{img}) = M_{img} \times M_{img} \rightarrow M_{name}$ $M_{img}, M_{name} \subseteq M$
4.	С.Я.	$M_I = \Psi_I(M) = SignI \subseteq M$
5.	Модель мира	$M_{wmod} \subseteq M$
6.	Эмоции	$\Psi_{emo} = \Psi_{emo}(N, S, A, E) \rightarrow A \times E$
7.	Выбор лидера*	$\Psi_{leader} = \Psi_{leader}(W) \rightarrow A$
<b>Производные механизмы</b>		
8.	Движение*	$\Psi_{mov} = \Psi_{mov}(\Psi_{inf})$
9.	Сигнальная коммуникация	$\Psi_{sc} = \Psi_{sc}(E, \Psi_{inf})$

	<b>Механизм</b>	<b>Описание</b>
10.	Идентификация	$\Psi_{ident} = \Psi_{ident}(\Psi_{rec}, \Psi_{comp})$
11.	Картина мира	$\Psi_{wp} = \Psi_{wpic}(\Psi_l, \Psi_{wmod})$
12.	Контагиозное поведение	$\Psi_{cont} = \Psi_{cont}(\Psi_{sc}, \Psi_{emo})$
13.	Агрессия	$\Psi_{aggr} = \Psi_{aggr}(\Psi_{inf}, \Psi_{ident}, \Psi_{emo}) \rightarrow A$
14.	Социальное обучение	$\Psi_{ss} = \Psi_{ss}(\Psi_{ident}, M_I) \rightarrow A \times S$
15.	Подражательное поведение	$\Psi_{ib} = \Psi_{ib}(\Psi_{rec}, \Psi_{ident}, M_I) \rightarrow A \times S$
16.	Доминирование	$\Psi_{dom} = \Psi_{ib}(\Psi_{aggr}, \Psi_{ident}, \Psi_{leader}) \rightarrow A$

Это – перечень механизмов, необходимых для создания социума, компоненты для решения обобщенной задачи – поддержания территориального гомеостаза, к которой сводится ряд практических задач ГР. Именно эти базовые механизмы и их производные стали основой для разработки моделей, алгоритмов и соответствующего программного обеспечения при создании групповых робототехнических комплексов, которые были описаны выше. Звездочкой отмечены базовые механизмы, реализуемые "как есть", т.е. не рассматриваемые как отдельные модели (к этой категории относится и процедура выбора лидера).

## **4.4. Управление социумом**

### **4.4.1. Специфика управления**

Разумеется, основная цель исследований заключается в том, чтобы решать реальные прикладные задачи: патрулирование, разведка, охрана, мониторинг и т.п. (далее мы будем обозначать этот перечень задач термином "стандартные задачи групповой робототехники"). Уже говорилось о том, что специфика решения прикладных задач заключается в том, что мы не можем вычленить лишь некоторые модели и механизмы для решения частных задач. Мы рассматриваем социум как это некое устойчивое, замкнутое образование, деятельность которого поддерживается целым комплексом законов и правил внутригруппового взаимодействия: от когезии до социального доминирования.

С практической точки зрения речь идет о следующем. Группа роботов, обладая всей атрибутикой социального сообщества, функционирует на ограниченной территории, поддерживая постоянство состава. При этом это сообщество является зарытым, т.е. проявляет агрессию по отношению к чужакам [Зорина, Полетаева, Резникова, 2002]. Никакого иного целеполагания для существования социума, кроме устойчивости группировки во времени, нет. Единственное, что может подлежать варьированию или управлению, – это то, что называется характером сообщества. Если нам важно, чтобы группа роботов решала задачу охраны территории, то необходимо "усилить" такую характеристику социума, как агрессивность по отношению к чужакам; если нас

интересует задача мониторинга состояния территории или задача рекогносцировки, то следует уменьшить стремление держаться вместе (когезия) и т.д.

Эти соображения можно представить в виде некоторой таблицы:

Табл. 4.3. Задачи и характер поведения

Задача	Характер поведения
Охрана территории	Агрессия к чужакам высокая; когезия сильная.
Захват территории (экспансия)	Сильное доминирование; агрессия к чужакам высокая; когезия слабая.
Функционирование в сложных (неблагоприятных) условиях	Кооперация высокая; эмоциональная отзывчивость высокая.
...	...

Можно выделить три способа целенаправленного изменения характера поведения социума:

1. Прямое воздействие на индивида (изменение его параметров и структуры).
2. Оказание воздействия на окружающую среду (косвенное управление).
3. Управление такими социальными надстройками, как «нравственные» установки.

При этом все эти виды управления должны обеспечивать существование социума как целостного образования. А это в свою очередь означает, что все механизмы, требуемые для функционирования социума (когезия, контагиозность, подражание, социальное доминирование, агонистическое поведение, обучение и пр.), должны быть сохранены.

**Прямое воздействие на индивида.** Выше, в разделе "Феномен паразитического управления", мы обсуждали принципы и модели такого манипулирования. С точки зрения управления индивидуальным поведением это манипулирование является наиболее естественным и "безопасным". Все механизмы социального взаимодействия остаются неизменными. Меняется лишь *характер* индивидуального поведения и, как следствие, характер поведения всего социума. Наиболее явный эффект изменения поведения социума может наблюдаться при оперировании такой характеристикой, как агрессивность.

**Оказание воздействия на среду.** Очевидность влияния свойств среды на организацию и поведение индивидов не позволяет, тем не менее, говорить о наличии готовых конструктивных механизмов целенаправленного управления социумом. В той же этологии имеется лишь впечатляющий набор описаний различного рода феноменов и

проявлений такого влияния, причем тоже весьма очевидных. На сугубо качественном уровне можно определить ряд "рецептов" управления. Например, увеличение плотности кормовой базы приведет к тому, что численность семейств (группировок роботов) будет уменьшаться вкупе с уменьшением дифференциации функций (кастовый полигамия). Это – следствие того, что при благоприятных для индивида условиях высокая социализация уже не нужна. Напротив, ухудшение кормовой базы приведет к таким следствиям, как повышенная агрессия, склонность к экспансии и пр. Кроме того, изменение условий существования может приводить к появлению таких феноменов, как социальный паразитизм (вплоть до т.н. "рабовладения"). Иными словами, можно определить множество таких каузальных зависимостей, однако проблема заключается в том, что модели таких процессов являются не только многофакторными, но и неопределенными. Сейчас можно лишь констатировать отсутствие формальных или конструктивных моделей управления социумами искусственных агентов путем оказания влияния на свойства среды. Пока это является предметом перспективных исследований.

**Управление социальными надстройками. Мораль.** Одним из механизмов адаптации развитых животных является мораль как свод правил поведения верхнего уровня. Мораль – это наиболее гибкая и вариативная надстройка системы управления. Нормы морали могут меняться многократно в течение жизненного цикла индивида. Управление потребностями индивида или характером его поведения – это достаточно грубые способы вмешательства, чреватые нарушениями работоспособности. Гораздо удобнее оперировать надстройкой, отвечающей за характер внутрисоциальных отношений, т.е. тем, что мы называем в человеческом обществе моралью. Несмотря на всю опасность антропоцентричности подхода, при котором сугубо человеческие понятия переносятся на социум искусственных агентов, можно ожидать, что в таком редукционизме имеется некоторое сугубо рациональное зерно. Так, есть все основания полагать, что наличие С.Я. как явного компонента семиотической модели мира агента, понимание сути процессов отождествления С.Я. с наблюдаемыми контрагентами, а также наличие механизма подражания, – все это открывает путь к пониманию понятия морали поведения агентов с конструктивной точки зрения.

#### 4.4.2. Вопросы этики поведения

Следуя [Гусейнов, Апресян, 2000], будем считать, что слова "этика", "мораль", "нравственность" можно употреблять как взаимозаменяемые (хотя иногда под этикой понимается наука, область знания, а "мораль" или "нравственность" употребляются как синонимы и являются предметом этики).

Разумеется, моральная философия не рассматривает мораль лишь как механизм групповой и индивидуальной адаптации посредством социальной организации поведения [Апресян, 2017]. Такой "механистический" подход более присущ эволюционным и этологическим теориям, однако, решая сугубо технические задачи, мы вынуждены придерживаться именно "адаптивного" понимания сути морали. Итак, будем полагать, что мораль – это один из механизмов адаптации. Вопрос о том, применимо ли понятие морали к искусственным агентам, решается самими философами неоднозначно, но здесь мы сошлемся на замечание Р. Апресяна: "...если мы ассоциируем мораль с человеческими отношениями" [Апресян, 2013]. Эти, признаемся, выдранные из контекста слова развязывают нам руки и дают право говорить о моральных аспектах отношений не только между людьми, но и прочими (в т.ч. – искусственными) индивидами.

Далее выделим три основных вопроса, определяющих содержание морального поведения: (1) зачем такое поведение нужно, (2) какова целевая функция (или основной регулятив), определяющая поведение, (3) каковы механизмы, лежащие в его основе.

**1. Необходимость морали.** Ответ на этот вопрос уже был дан. Мораль – это механизм адаптации, то, что позволяет функционировать социуму более эффективно. При этом важнейшей особенностью морали является ее гибкость, вариативность. Эта надстройка над базовыми моделями поведения чрезвычайно "легковесна" и может варьироваться в широких пределах на протяжении жизненного цикла индивида.

**2. Целевая функция регулирования поведения.** Основополагающим регулятивом в межличностных отношений является т.н. "золотое правило" морали. Суть этого правила в определении отношений, основанных на практике взаимности: "ты – мне, я – тебе". Генезис этого правила описан в работе [Апресян, 2013]. Сейчас наша задача не в том, чтобы анализировать, подобно Ницше, "происхождение наших моральных предрассудков" (цит. по [Апресян, 2013]). Генеалогия морали – это тема отдельного обсуждения. Здесь важно лишь отметить, что, во-первых, это правило задает целевую функцию морального поведения. А во-вторых, золотое правило может быть дано в позитивной (поступать по отношению к другим так, как желаете, чтобы поступали по отношению к вам) и негативной (непричинение вреда другим) форме. Для реализации этого основного правила морального поведения требуется определение того, что такое "хорошо" и что такое "плохо" для индивида. Ответ на этот вопрос кроется в понимании сути механизмов, определяющих основу морального поведения.

**3. Механизмы, лежащие в основе морального поведения.** Очевидно, что подражательное поведение и социальное обучение можно рассматривать лишь как очень

далекий базис для поведения, оцениваемого с точки зрения морали. Однако существует механизм, имеющий более явную связь с этикой поведения и называемый эмпатией.

**Эмпатия.** Под этим термином понимается способность к отзывчивости на эмоциональные состояния окружающих индивидов разной степени близости. Считается, что эмпатия определяет эмоциональную склонность к сотрудничеству и проявление альтруизма. Разумеется, предрасположенность индивида к эмпатии является необходимым, но не достаточным свойством для моральности индивида. Но в этом вопросе нас интересуют два аспекта эмпатии – механизм ее реализации, а также объект эмпатии.

Реализация механизма эмпатии возможна на том же принципе отождествления (или определения степени близости) наблюдаемого агента с *С.Я.* Со всеми вытекающими последствиями и особенностями поведения. С объектом эмпатии (как отзывчивости на эмоциональное состояние) дело обстоит несколько сложнее. В определенном смысле эмоции – это, прежде всего, способ интегральной оценки состояния индивида (см. Информационную теорию эмоций П.Симонова, [Симонов, 1982]). Роль эмоций как фактора, стабилизирующего поведение, контрастирующего сенсорное восприятия и пр., для деятельности не только животных, но и искусственных агентов (роботов), уже обсуждалась в этой работе. Здесь же важно, что эмпатия – это основа для более высокого уровня управления, связанного с целеполаганием и планированием. В терминах моральной философии это означает действие золотого правила: либо реализовывать такой план действий, при котором контрагенту будет хорошо (увеличение уровня эмоционального состояния, позитивная формулировка правила: "поступай так, чтобы..."), либо сформировать план, не ведущий к появлению отрицательных эмоций контрагента (негативная формулировка: "не навреди"). В любом случае эмоциональное состояние контрагента оказывает влияние на формирование мотива поведения, его цели. Как видно, эмпатия здесь подразумевает наличие гораздо более высокого уровня управления. Иными словами, "моральность" поведения – это прерогатива сложной когнитивной системы, способной решать задачи целеполагания и последующего планирования, и способной к эмпатии. Частично эти вопросы затронуты в работах [Карпов, Ивашина, 2019], [Карпов, 2019a], [Карпов, 2019b].

#### 4.4.3. Экспериментальная мораль

Для оценки влияния моральных норм на эффективность поведения аниматов совместно с П.С. Сорокоумовым [Карпов, Сорокоумов, 2021] была рассмотрена задача по моделированию их пищевого поведения. Сузим общую задачу управления социума и

рассмотрим, как варьирование такого параметра как симпатия (и, как следствие, степень альтруизма/эгоизма), влияет на характер поведения агентов и социума в целом. Важно подчеркнуть, что здесь нас не интересуют вопросы происхождения или обусловленности альтруизма или определение особенностей соотношения числа альтруистов и эгоистов в группе. Исследований на эту тему крайне много. Например, в работе А. Маркова [Марков, 2011] говорится о популяционной значимости альтруизма, об особенностях статистического распределения альтруистов и эгоистов (парадокс Симпсона) и прочих вопросах, относящихся к этике и эволюционной психологии. А в работе П. Чеботарева и соавторов [Чеботарев и др., 2018] исследуются вопросы эффективности эгоистической и альтруистической стратегий в различных по степени благоприятности средах. Здесь основным является вопрос применимости предложенных моделей индивидов для решения задачи организации внутригруппового взаимодействия.

Симпатия – это достаточно близкое к эмпатии понятие, под которым понимается устойчивая эмоциональная предрасположенность к другим. Это явление также является следствием сопоставления наблюдаемого конспецифика с *Я*. Естественно, сила симпатии зависит от степени близости конспецифика. Следует еще раз отметить, что это – прямое следствие организации знак-ориентированной картины мира. Возбуждение отдельных компонентов знака (перцепта, значения или личностного смысла) приводит к возбуждению его остальных компонентов, в том числе – и собственно имени *Я*.

Рассмотрим следующую задачу. Пусть среда обитания аниматов представляет собой клеточное поле, в котором находятся агенты и частицы пищи. В каждой клетке могут находиться частица пищи и произвольное количество агентов. Моделирование проводится пошагово. На каждом шаге агент выполняет одну из допустимых элементарных операций: передвижение на одну из восьми соседних клеток, поедание пищи либо кормление другого агента. Поедание пополняет количество ресурсов у агента, выражющееся величиной  $R \in [0, 1]$ . В качестве пищи агент может воспринимать как частицы пищи, так и других агентов; при этом допустимо только поедание более слабого агента более сильным (т.е. имеющим большее значение ресурса  $R$ ). Задача заключается в определении влияния склонности к симпатии на эффективность поведения аниматов.

У аниматов имеются потребность в пище  $N_{food}$  и потребность в безопасности  $N_{safety}$ . – постоянные величины в диапазоне  $[0, 1]$ , характеризующие значимость соответствующих факторов. Сенсоры анимата определяют восприятие внешнего мира, а также внутреннего состояния и задаются числами в диапазоне  $[0, 1]$ :

$S_{food}$  – наличие пищи, вычисляется суммированием питательности видимых частиц пищи (к ним могут относиться и другие агенты);

$S_{hungry}$  – оценка чувства голода,  $S_{hungry} = (I - R)$ ;

$S_{friend}$  – наличие дружественных аниматов-конспецификов, вычисляется как суммарное число воспринимаемых "своих" агентов;

$S_{danger}$  – опасность; определяется как суммарное количество агентов-чужаков.

Аниматы могут выполнять следующие процедуры:

$P_{eat}$  – питание. Реализует комплексное пищевое поведение (как питание самого агента, так и кормление других). Здесь – поедание пищи на клетке агента; движение к видимой пище; кормление другого агента либо движение к нему с целью накормить.

$P_{escape}$  – бегство. Реализует поведение, позволяющее избежать опасности. Здесь – движение в направлении, противоположном положению опасного агента. Коэффициент уверенности процедуры равен значению сигнала шлюза опасности.

$P_{search}$  – исследование. Реализует блуждание в случайно выбранном направлении.

Использованный набор процедур приближённо соответствует основным формам поведения живых существ, выделяемых этологами: пищевое, агонистическое, исследовательское, и репродуктивное (родительское). В предлагаемой модели вопросы размножения исключены из рассмотрения, а такой элемент родительского поведения, как кормление, входит в состав обобщенной процедуры питания. Мы не беремся утверждать, что обмен пищей среди насекомых (трофаллаксис) обусловлен именно базовым родительским поведением, но здесь принято именно такое допущение, если мы хотим оставаться в рамках биологического правдоподобия.

Видно, что для реализации перечисленных действий необходимы, как минимум, элементарные операции передвижения в указанную соседнюю клетку, поедания пищи и кормления другого агента. За каждое передвижение агент тратит фиксированное количество ресурса  $R$ :

$$R(t) = \max(R(t-1) - \Delta R, 0), \quad (4.16)$$

где  $R(t)$  и  $R(t-1)$  – количество ресурсов на текущем и предыдущем шаге,  $\Delta R$  – затраты на один шаг передвижения, малая величина, определяемая количеством съедаемой пищи  $w$ , а также характерным линейным размером поля  $L$ ,  $\Delta R \sim (wL)^{-1}$ . В проводимых экспериментах  $\Delta R=0,001$ . Затраты ресурса  $R$  заставляют агента испытывать недостаток в нём и искать пищу для его пополнения.

Операция питания допустима, если агент находится в одной клетке с пищей (частицей или другим агентом). При питании текущий ресурс агента увеличивается, при этом съеденная частица пищи исчезает, а съеденный агент остаётся в модели, но с нулевым количеством ресурса  $R$ :

$$R_{self}(t) = R_{self}(t-1) + w(t-1) - R_{self}(t-1)w(t-1), w(t) = 0, \quad (4.17)$$

где  $R_{self}$  и  $w$  – количество ресурса у субъекта и объекта действия. Смерть агентов в модели отсутствует для поддержания постоянного состава популяции без дополнительного моделирования процессов размножения.

При кормлении одним агентом другого их запасы ресурса становятся равными среднему значению их запасов ресурса до этой операции:

$$R_{self}(t) = R_{other}(t) = (R_{other}(t-1) + R_{self}(t-1))/2 \quad (4.18)$$

И питание, и кормление допустимы, только если их участники находятся в одной клетке.

Для отражения особенностей социальных взаимодействий в архитектуру были введены дополнительные механизмы: склонность аниматов к симпатии и сигнальная коммуникация.

**Склонность к симпатии.** Главным параметром, определяющим допустимые для агента действия путём сопоставления наблюдаемого конспецифика и субъективного Я, является т.н. склонность к симпатии  $S$ ,  $S \in [-1, 1]$ . Этот параметр определяет восприятие других агентов с точки зрения "свой-чужой". Агент, у которого  $S > 0$ , отождествляет наблюдаемого конспецифика с собой с коэффициентом уверенности  $S$ ; механизм подобного отождествления описан выше. В результате такого отождествления агент способен делиться пищей с этим конспецификом. Агент с отрицательной симпатией не отождествляет себя с другими агентами, рассматривая их как источник ресурсов (пищу) с коэффициентом уверенности  $/S$ . При нулевой симпатии агент безразличен (толерантен) к другим агентам. При этом если агент видит чужого, ресурс которого больше, чем у него самого, тогда этот чужой воспринимается как опасность.

**Сигнальная коммуникация.** Кроме симпатии на поведение агента могут влиять действия, выполняемые другими агентами того же вида, а также результаты анализа состояния конспецификов. Мы не будем рассматривать вопросы распознавания действий или состояния агентов в силу того, что в природе существует такое явление, как сигнальная коммуникация. Вопросы сигнальной коммуникации и схема когезии были рассмотрены ранее. Ограничимся здесь лишь констатацией двух фактов:

1. Внешние коммуникационные сигналы воздействуют на шлюзовые элементы (естественно, эти сигналы не могут затрагивать сенсорику, потребности, и тем более процедуры).
2. Генерация сигналов определяется как побочное действие поведенческих процедур, при этом, что важно, генерации подлежит сигнал, соответствующий

той процедуре, с которой связана максимальная по значению отрицательная эмоция.

Схема фрагмента эмоционально-потребностной архитектуры, иллюстрирующая работу этих механизмов, приведена на Рис. 4.10.

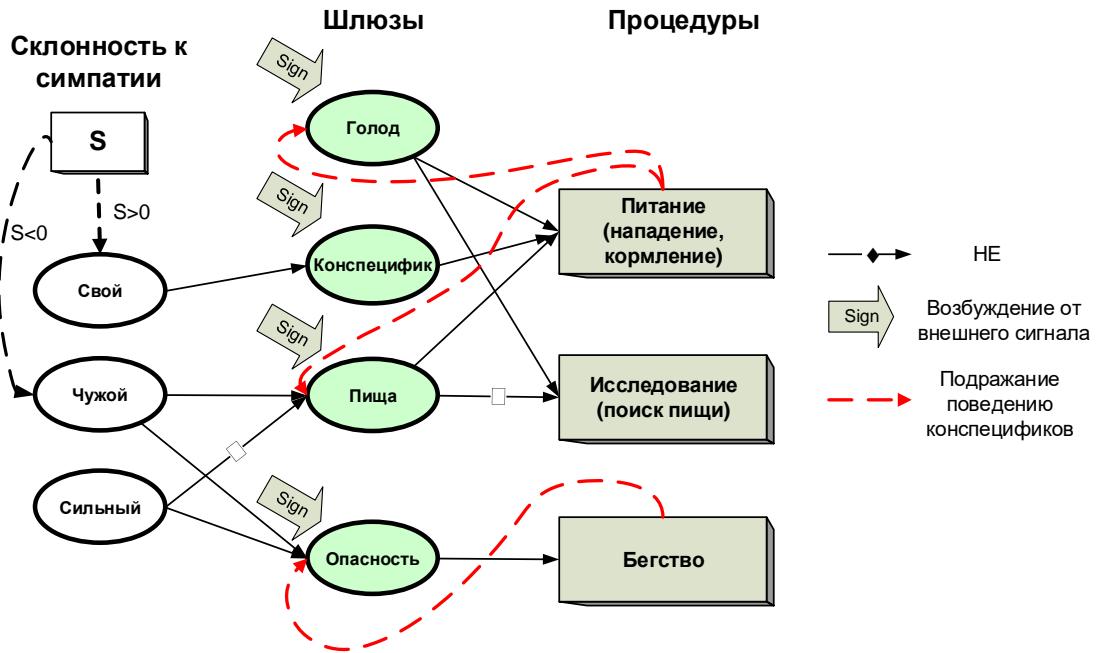


Рис. 4.10. Дополнения к архитектуре, позволяющие обработать контагиозное поведение и восприятие сигналов друг друга. Красными пунктирными стрелками показаны пути влияния поведения видимых агентов на поведение текущего агента; показано, что на сенсоры агента влияет его симпатия

Интерпретация схемы очевидна. Например, если ранее сигнал шлюза "Опасность", определяющего активизацию процедуры убегания, формировался неким абстрактным сенсором "Опасность", то теперь происходит конкретизация:

ЕСЛИ наблюдаю\_конспецифика И  $S > 0$ , ТО класс\_объекта := "Свой"

ЕСЛИ наблюдаю\_конспецифика И  $S < 0$ , ТО класс\_объекта := "Чужой"

ЕСЛИ класс\_объекта == "Чужой" И признак\_объекта == "Сильный", ТО  
воздушить\_шлюз\_Опасность

ЕСЛИ сигнал == "Опасность", ТО воздушить\_шлюз\_Опасность

и т.д.

Для упрощения моделирования коммуникации вместо явного введения попарных взаимодействий считается, что каждому агенту известно, какую процедуру исполняют в текущий момент видимые им агенты. Чем больше видимых агентов выполняют некоторую

процедуру, тем в большей степени сам агент склонен поступить так же. Математически это выполняется усилением сигналов от тех сенсоров, которые потенциально могут запустить нужную процедуру. Таким образом, влияние поведения и/или состояния окружающих конспецификов на поведение агента проявляется в модификации выражения для выхода шлюзового элемента (2.8). Для учёта этого влияния она должна выглядеть как

$$G_i = k_{ext} \left( S_i \oplus \sum_{j \in Es_i} e_j \oplus \sum_{k \in R_{S_i}} I_k \right) \quad (4.19)$$

где  $I_k$  – число агентов, выполняющих в текущий момент какую-либо процедуру  $k$  из множества влияющих на текущий шлюз  $G_i$  процедур  $R_{S_i}$ .

Параметр  $S$  у агента, характеризующий его симпатию в текущий момент времени, можно менять различными способами. Так как в качестве интегрального показателя правильности выбранных агентом действий можно использовать его текущий эмоциональный уровень  $E$ , то изменение  $S$  осуществлялось при  $E < 0$ . При этом закон изменения  $S$  выражает в данной модели господствующие в данном сообществе моральные нормы. Среди различных вариантов изменения  $S$  в работе были рассмотрены следующие:

1.  $S$  изменяется на малую величину со случайным знаком.
2.  $S$  изменяется на малую величину, знак которой положителен при  $S > 0$  и отрицателен при  $S < 0$  (сохранение склонности к альтруизму/эгоизму и стремление к экстремальным вариантам).

Итак, введение компонентов, определяющих особенности социального взаимодействия, не затрагивает эмоционально-потребностную архитектуру. Эти компоненты – склонность к симпатии и сигнальная коммуникация, воздействуют исключительно и только на сенсорную систему анимата.

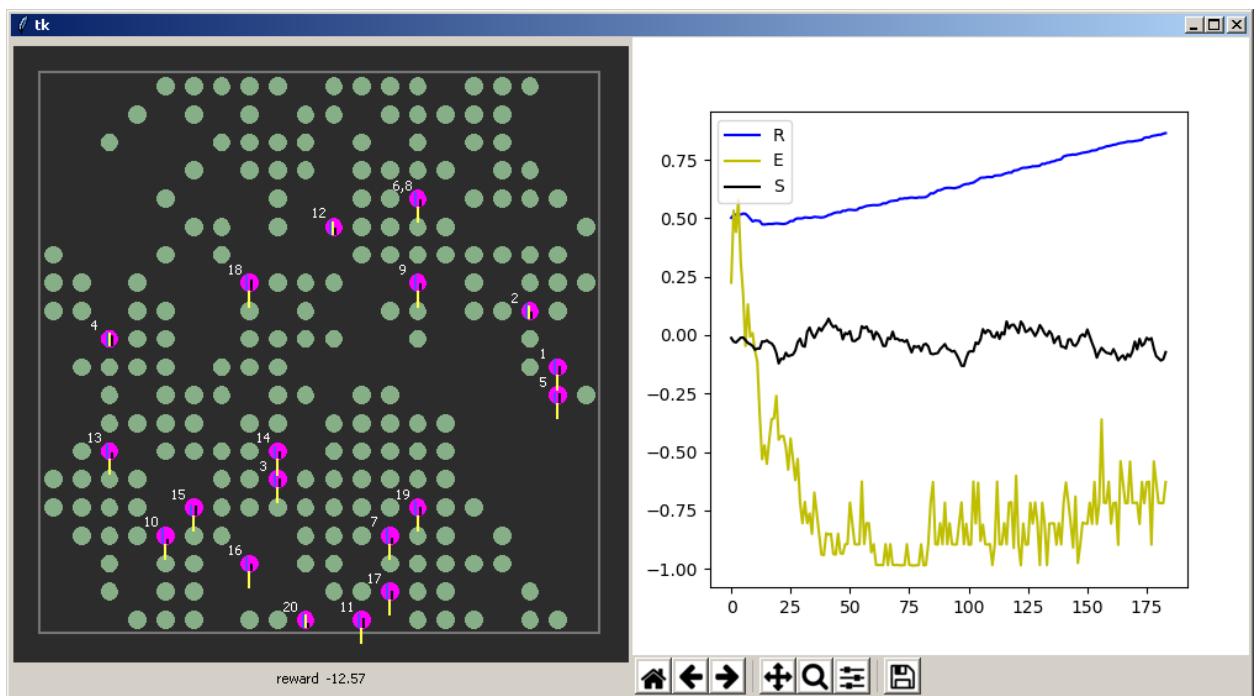
## Эксперименты

Для оценки влияния метода изменения эмпатии  $S$  была проведена серия экспериментов с разработанной моделью. Описанная среда была реализована в виде приложения на языке Python. Пример вида среды с агентами и пищевыми частицами в его интерфейсе показан на Рис. 4.11. В начале обработки агенты распределяются по карте случайно. Запасы пищевых частиц пополняются после каждого шага моделирования: в каждой клетке, соседней по отношению к съедобной частице, может появиться новая частица с некоторой заданной вероятностью. Эта вероятность при фиксированном начальном количестве пищи на карте определяет ресурсное богатство среды обитания.

Агенты способны перемещаться с разной скоростью в зависимости от текущего значения ресурса  $R$ . Реализуется это путём разрешения агенту перемещаться не на каждом шаге моделирования, а каждые  $D$  шагов:

$$D = \left\lceil \frac{1}{R+0.1} \right\rceil, \quad (4.20)$$

где  $\lceil X \rceil$  – результат округления  $X$  до ближайшего сверху целого числа. Это позволяет, например, агенту с  $R=1$  двигаться каждый шаг, а агенту с  $R=0$  – каждые 10 шагов, то есть с намного меньшей скоростью. Такая возможность добавлена для поддержания минимального ненулевого уровня деятельности сообщества даже при малых количествах пищи.



*Рис. 4.11. Внешний вид модели в разработанной среде моделирования. Зелёными кругами обозначены частицы пищи, пронумерованными розовыми кругами – агенты. Параметры  $R$  (количество ресурса),  $E$  (эмоциональный уровень),  $S$  (уровень симпатии) показаны на каждом агенте столбиками. В правой части приведены графики зависимости  $R$ ,  $E$ ,  $S$  от шага моделирования*

Целью проводимых экспериментов было исследование зависимости конечных значений параметров агентов от закона изменения симпатии  $S$  и богатства среды питательными частицами. Общей предпосылкой было то, что значение симпатии  $S$  изменяется только у «несчастливого» агента, т.е. при уровне эмоций  $E < 0$ . Исследовано случайное и целенаправленное изменение симпатии  $S$ .

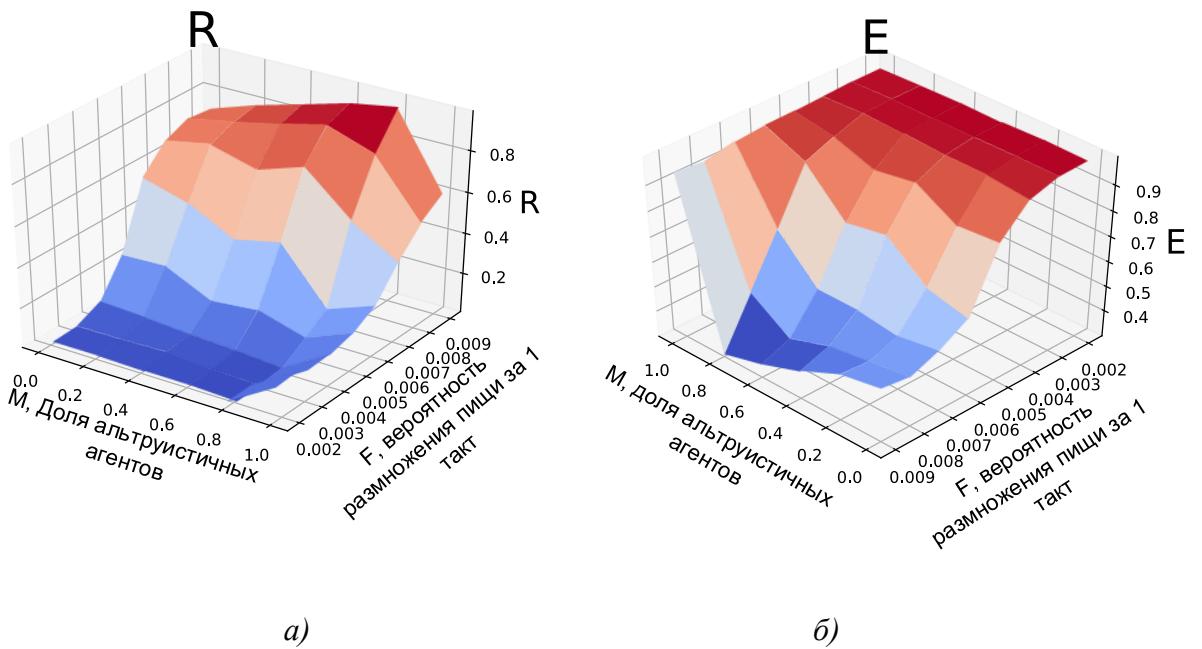
Случайное изменение  $S$  выражалось в том, что симпатия  $S$  изменялась на малую величину ( $0,1$ ) со случным знаком, т.е. «несчастливый» агент немного менял своё отношение к другим агентам в ту или иную сторону. При целенаправленном изменении  $S$  «несчастливый» альтруистичный агент ( $S>0$ ) становился более альтруистичным, а эгоистичный ( $S<0$ ) – более эгоистичным, т.е. величина  $S$  стремится к экстремальным значениям.

Использовалась среда размером  $50 \times 50$  клеток с  $50$  агентами, из которых половина изначально имела  $S=0.5$ , половина –  $S=-0.5$ . Моделирование проводилось в течение  $1000$  шагов, что позволило системе в каждом случае достичь стационарного состояния. Каждый вариант модели запускался  $10$  раз с последующим усреднением результатов.

Показателем эффективности деятельности группы является успешность сбора ею пищи, которая может быть оценена по среднему значению  $R$  в конце моделирования. В богатых питанием средах для эффективно собирающей пищу группы  $R$  должно в среднем стремиться к единице, в бедных – к нулю.

Были исследованы различные показатели модели: изменения средних параметров агентов в зависимости от степени богатства среды обитания пищей, времена их стабилизации, зависимость  $S$  от богатства среды и т.п. Наиболее же интересными являлись эксперименты, определяющие влияние среды на соотношение между альтруистами и эгоистами в обществе.

**Доля альтруистов/эгоистов в обществе.** Для выявления зависимостей между альтруистичностью агентов и эффективностью их работы была промоделирована деятельность групп одинаковой численности ( $50$  участников), но с разной долей альтруистичных агентов (от  $0$  до  $100\%$ ). При этом у всех эгоистичных агентов склонность к симпатии  $S=-0.75$ , а у всех альтруистов  $S=0.75$ . Средние значения  $R$  и  $E$  на последнем шаге моделирования изображены на Рис. 4.12.



*Рис. 4.12. Графики зависимостей успешности группы от условий существования *F* и доли альтруистов *M*: а) зависимость суммарной успешности группы *R*; б) зависимость эмоционального уровня *E*. Направления изменения *F* на графиках противоположны для более явной демонстрации характера зависимости*

Видно, что при возрастании продуктивности среды при постоянной симпатии *S* средние значения *R*, как и следовало ожидать, монотонно возрастают. Однако зависимость *R* от доли альтруистичных агентов оказалась немонотонна; в частности, для самых продуктивных сред (вероятность размножения пищи 0.009) наибольшее среднее значение *R* достигалось при 80 % альтруистичных агентов. Полностью альтруистичный коллектив оказался в целом менее продуктивен в богатых средах, чем коллектизы с агрессивными агентами, но в бедных средах продуктивность такого коллектива выше. Наиболее вероятной причиной такой зависимости является постоянная раздача ресурсов агентами друг другу вместо сбора новых ресурсов при полном отсутствии хищников; это понижает как потери ресурса при хищничестве, так и интенсивность их сбора.

Анализ значений *E* в этих же результатах показывает, что в целом при отсутствии ресурсов эмоциональный уровень значительно выше, чем при их наличии. Объясняется это существованием в такой ситуации только одного варианта действий – поиска пищи; если же агенту приходится выбирать из множества вариантов, часть из них остаётся неиспользованной, и это понижает *E*.

Итак, выводы достаточно очевидны:

1. Моральность общества важна в сложных условиях существования, в бедных средах; для выживания в этих условиях требуется кооперация. Когда среда

богата и взаимопомощь не требуется, то более выигрышной индивидуальной тактикой является эгоизм, вплоть до проявления агрессии.

2. В бедных средах уровень  $E$  выше, чем в богатых. Если все-таки интерпретировать  $E$  как показатель счастья (по И.Канту: "*Счастье – это такое состояние разумного существа в мире, когда все в его существовании происходит согласно его воле и желанию*", [Кант, 1997]), то это можно перефразировать так: бедные живут более счастливо, потому что у них есть меньше неудовлетворенных потребностей.

Из проведённых экспериментов видно, что моральные агенты способны эффективно функционировать в заданной среде, причём изменение моральных норм позволяет плавно регулировать поведение группы, не меняя его характер кардинальным образом. При этом основное влияние моральные нормы оказали на поведение в неблагоприятных условиях, что можно использовать для тонкой настройки реакции на них.

Естественно, что имеющиеся у анимата базовые механизмы, определяющие характер социального взаимодействия, влияют на его поведение и эффективность функционирования группы в целом. Важнее, что было продемонстрировано: склонность к социализации (эмпатии, альтруизму) определяется свойствами среды обитания. Это – достаточно естественные утверждения, однако основная задача была в том, чтобы показать работоспособность предложенной архитектуры и механизмов, определяющих моральные аспекты поведения.

Основной задачей проведенных исследований было не столько получение новых результатов из области моральной философии или социологии, сколько изучение базовых механизмов, лежащих в основе подобного рода феноменов. Эксперименты лишь подтвердили известные вещи: моральность общества (если принять, что альтруизм является одним из показателей таковой) действительно особенно важна с трудных условиях существования; количество счастья (если принять такую трактовку параметра  $E$ ) не зависит напрямую от условий существования; что в экстремально тяжелых и экстремально благоприятных средах понятия эмпатии и симпатии не играют заметной роли и т.п. Цель экспериментов была в том, чтобы показать адекватность предложенной архитектуры анимата и моделей поведения философским, социологическим и даже бытовым представлениям о содержании морального поведения. Это же касается рассуждений и о том, зачем необходима мораль. Значимость норм морали как адаптивного механизма обсуждению не подлежит. Важно было продемонстрировать возможность перехода от абстрактных рассуждений гуманитарного плана к вполне

конструктивным схемам и моделям, позволяющим рассматривать вопросы морали с технической, экспериментальной точки зрения.

## **4.5. Фундаментальные элементы**

### **4.5.1. О сути моделирования социального поведения**

Уже говорилось о том, что изучение моделей социального поведения рассматривается как одно из направлений исследований в области групповой робототехники. Методология этого направления основана на применении моделей и механизмов социального поведения животных для построения искусственных систем, как на техническом, так и модельном уровнях.

Для решения некоторой прикладной задачи создается множество соответствующих моделей, методов, алгоритмов, форм группового взаимодействия. Совершенно естественным является желание создать действительно универсальные системы групповой робототехники, способные решать широкий круг задач. Для этого целесообразно свести множество разнообразных частных задач к некоторой единой, обобщенной задаче.

В природе имеются примеры подобного рода единых задач и способов организации взаимодействия. Это – сообщества социальных животных. Предлагаемая парадигма как раз и заключается в создании единой основы для организации группового взаимодействия, разработке базового набора механизмов, позволяющих реализовывать эффекты социальной организации группы агентов – роботов.

**О термине Парадигма.** Согласно словарю *Merriam-Webster*, одним из толкований слова "парадигма" является следующее: философско-теоретические основы научной школы или дисциплины, в которых сформулированы теории, законы, обобщения и проведенные в их поддержку эксперименты ("A philosophical and theoretical framework of a scientific school or discipline within which theories, laws, and generalizations and the experiments performed in support of them are formulated") [Merriam-Webster, 2019]. Или проще (там же): теория или группа идей о том, как что-то должно быть сделано, реализовано или продумано ("A theory or a group of ideas about how something should be done, made, or thought about").

Исходя из этого, подход, основанный на использовании МСП для создания систем группового управления, с полным правом может быть обозначен как **парадигма**.

Справедливости ради отметим, что Т.Кун понимал термин "парадигма" значительно шире: "Под парадигмами я подразумеваю признанные всеми научные достижения, которые в

течение определенного времени дают научному сообществу модель постановки проблем и их решений" [Кун, 1977]. Здесь, разумеется, мы не претендуем на такую фундаментальность.

Предметом МСП являются общие принципы организации поведения индивидов и искусственных сообществ. Однако системы групповой робототехники предназначены для решения вполне конкретных прикладных задач. Исходя из этого, в МСП выделяется т.н. прикладной уровень. Именно к прикладному уровню относятся задачи конкретной реализации тех или иных поведенческих функций. Например, реализация такого поведения, которое должно привести к выбору лидера в группе, распределению функций и задач, коллективному логическому выводу, выполнению сугубо прикладных функций.

Выше мы уже говорили о том, что само понятие поведения (в том числе – социального) является некоторой условностью. Может возникнуть вопрос о том, имеет ли смысл вообще говорить о реализации тех или иных моделей поведения? Нет ли здесь опасности создания химеры? Речь идет о попытках создания некоторого набора моделей и методов, реализующих отдельные поведенческие феномены и проявления социальности.

Основная задача, таким образом, заключается как раз в том, чтобы не строить эту химеру, а создать единый, целостный механизм поведения индивида и его взаимодействия с остальными членами группы. Используя при этом некий базовый, желательно – минимальный набор механизмов или методов.

**Фундаментальная проблема** заключается в определении в том, чтобы определить, какие регулятивные механизмы лежат в основе или те или иные виды поведения, в т.ч. – социального. Т.е. что может считаться базисом, определяющим многообразие поведения организма – анимата, робота, агента? Приведем несколько показательных примеров. Первый касается того, как искажается наблюдаемая картина поведения, имеющая на самом деле крайне примитивные базовые механизмы.

**Пример 1. Пищевое поведение.** Считается, что у муравьев существуют элементарные групповые единицы – звенья-тройки (Рис. 4.13). Причем это – не строгая иерархия отношений, а множество локальных иерархически организованных групп, см., например, [Богатырева, Богатырев, 2013].

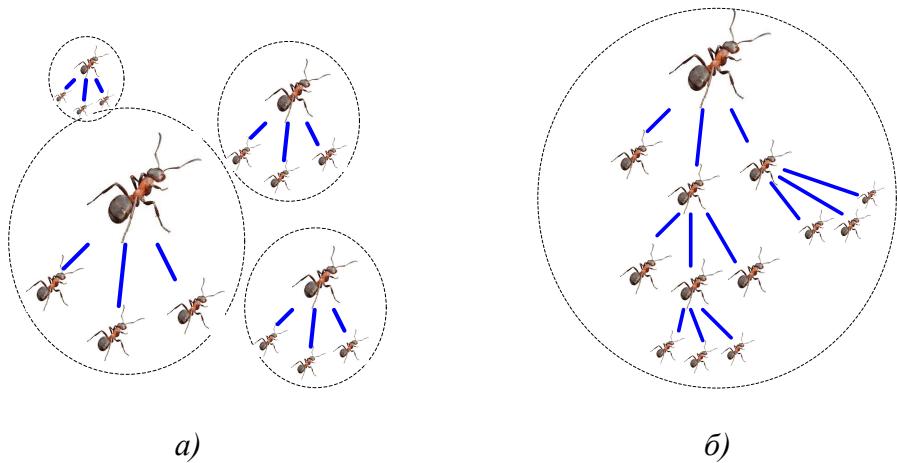


Рис. 4.13. а) Локальная иерархия: лидер и его "тройка", б) глобальная (строгая) иерархия

Эта иерархия проявляется в схеме фуражировки. Муравей-разведчик осуществляет поиск пищи по некоторой траектории (траектория "Поиск" на Рис. 4.14) и после ее нахождения возвращается в гнездо по кратчайшему пути (траектория "Возвращение"). Далее он мобилизует некоторое количество находящихся у гнезда муравьев, которые следуют за разведчиком в район обнаружения пищи. При этом часть муравьев остается у гнезда, образуя своего рода "мобилизационный ресурс".

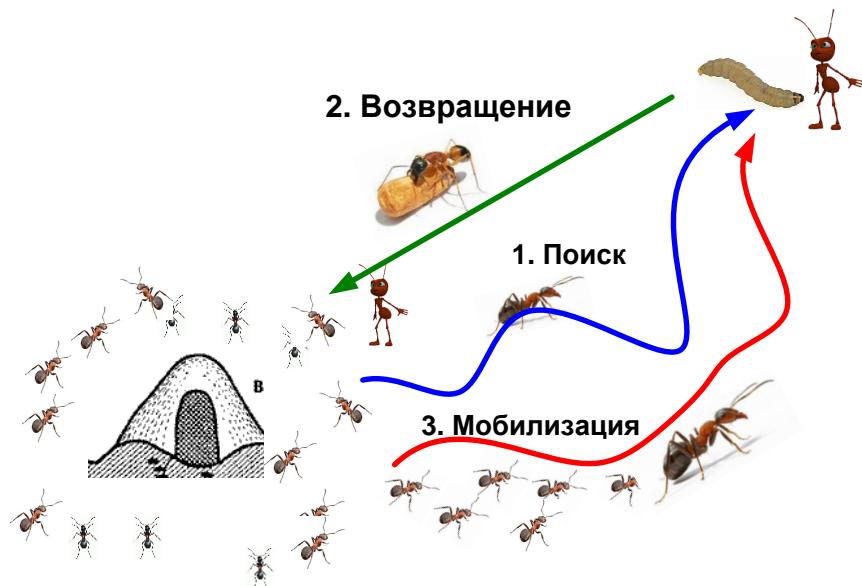


Рис. 4.14. Упрощенная схема пищевого поведения

Такая схема представляется вполне разумной и можно обосновать ее целесообразность. При этом важно, что иерархия отношений тоже весьма гибка. Вопрос отношения иерархии и индивидуальности в муравьином сообществе иногда рассматривается так: индивидуальность отвечает за стохастический компонент системы, а иерархия реализует структурный компонент системы. В работе [Богатырева, Богатырев, 2013] отмечается, что определяющим фактором является баланс между хаосом и

порядком. В зоне полного порядка поведение индивидов полностью регламентировано жесткими правилами группы. Это упрощает индивидуальное поведение, делает его высокоэффективным в локальном масштабе, однако влечет за собой неадаптивность группы. В зоне хаоса инициатива полностью переходит индивиду.

Итак, возникает вопрос: каким образом реализуется эта схема отношений и рассмотренная выше нетривиальная процедура фуражировки?

На самом деле, есть основания полагать, что элементарные групповые единицы муравьев – это звенья-тройки. Более того, согласно приведенным в [Богатырева, Шиллеров, 1998], [Bogatyreva, Shillerov, 2005] оценкам, из 300 муравьев только четверо оказались способны возглавить и организовать более 7 рабочих на строительстве нового гнезда. Причиной тому является весьма слабый механизм определения доминанта, заключающийся в том, что лидер – это тот, чья феромонная метка сильнее. Т.е. доминантом ("авторитетом") является тот муравей, который более успешен в пищевом отношении. Именно такому доминанту подражают остальные, следя за ним, например, при фуражировке.

В то же время оставшийся "мобилизационный ресурс" – это те особи, кто не услышал, не увидел, не распознал доминанта. Более того, иногда говорится о т.н. "ленивых" муравьях, которые не способны ни к какой подражательной деятельности. Согласно [Conover, 2009] у некоторых видов муравьев доля таких "ленивых" особей, которые ничего не делают при любом разделении групп, может достигать 20%.

Итак, основными **фундаментальными факторами**, определяющими (регулирующими) схему фуражировки, являются пищевая успешность индивида (принцип определения лидера или доминанта) и подражательное поведение.

**Пример 2. Темперамент.** Следующим показательным примером является такое явление, как темперамент. Напомним, что имеются две базовые величины – возбуждение и торможение, – определяющие те параметры и особенности поведения, которые мы характеризуем далее как холерическое, флегматическое и пр. Но никак не наоборот. Мы не строим множество правил, которые задавали бы, скажем, сангвиническую модель поведения. В этом смысле величины возбуждения и торможения являются **фундаментальными факторами**.

**Пример 3. Агрессивное поведение.** В этой работе достаточно много внимания уделялось роли агрессии и агрессивному поведению. Однако вряд ли представляется целесообразным выделять отдельный блок или модуль, реализующий собственно агрессивное поведение. Обычно мы говорим о том, что некие особенности поведения, называемые или оцениваемые нами как агрессивные, являются неотъемлемыми частями

самых различных моделей поведения – брачного, доминирующего, территориального и пр. Некоторые содержательные модели поведения аниматов, учитывающие регулятивную роль агрессии, приведены, например, в работах [Karpova, 2018], [Карпова, 2017а], [Karpova, Karpov, 2018].

**Пример 4. Федерации.** Федерация – это высшее достижение социальной организации у муравьев, своего рода панмуравейник. Это устойчивое образование, в котором нет войн между гнездами и колониями. Но вряд ли имеет смысл рассуждать о регуляторных функциях федерации, анализировать федерацию, как некий единый метаорганизм и пр. В основе функционирования федерации лежит единственный фактор – там все "свои". Федерация образовалась не для прекращения войн и конфликтов. Это, напротив, результат завершившейся войны. Все стали своими. Муравей, помещенный в отдаленное гнездо федерации, просто пахнет почти так же, как и остальные. Здесь базовым механизмом является обмен. И в некотором смысле агрессия на начальном этапе.

Проблема выявления фундаментальных элементовозвучна и этологическим представлениям. Например, в [Лоренц, 1994] говорится, что "*Поведение, единое с точки зрения функции – например, питание или размножение, – всегда бывает обусловлено очень сложным взаимодействием очень многих физиологических причин*" ("A definite and self-contained function of an organism, such as feeding, copulation, or self-preservation, is never the result of a single cause or of a single drive" [Lorenz, 2002]).

#### 4.5.2. Организм и среда

##### Критерий эффективности социума

Одной из основных проблем групповой робототехники является разработка эффективных средств управления поведением группы. Исходя из этого, центральными вопросами здесь могли бы являться определение целевой функции и задание критериев эффективности. Однако при моделировании социальных сообществ эти вопросы приобретают свою специфику. В конечном итоге все сводится к достижению единственной цели – выживанию особи.

Этологи полагают, что нельзя рассматривать социум как некий многоклеточный (многокомпонентный) организм. Воспринимать социум как организм можно лишь в метафорическом смысле, либо как некоторую макромодель. Напомним, что, согласно [Захаров, Захаров, 2013], основные задачи социума муравьев – это самосохранение в годичном цикле и расширенное воспроизведение населения, обеспечивающее развитие социума в многолетней перспективе.

Итак, критерий эффективности группы (социума) – личное благополучие особи. При этом индивидуальная состоятельность тех же муравьев определяется их пищевой эффективностью. Мы уже отмечали, что личный авторитет определяется количеством феромонных следов пищи. Этим же определяется роль лидера, доминанта.

Собственно, именно эта точка зрения задает направленность настоящего исследования, в котором основной упор делается на изучение особенностей индивидуальной организации и поведения, а не на модели макроуровня.

### **Сложность поведения индивида и эмерджентность**

При том, что в основе исследования лежит индивидуальное поведение особи, нас интересуют условия появления весьма сложных форм его поведения, и прежде всего такого, которое обладает эмерджентными свойствами, т.е. теми, которые возникают в социуме этих достаточно примитивных агентов.

Существует суждение, что зачастую сложность поведения индивида отражает сложность среды, а не обязательно сложность агента. Об этом говорит, например, Г. Саймон в [Simon, 1996] (*"An ant, viewed as a behaving system, is quite simple. The apparent complexity of its behavior over time is largely a reflection of the complexity of the environment in which it finds itself"*). Правда, первая часть его утверждения относительно простоты поведения муравья, как мы убедились, достаточно спорна. Таким образом, можно сделать следующий важный вывод:

В основе природной эмерджентности лежат весьма примитивные механизмы. Природа лаконична. Наблюдаемая сложность поведения или функционирования – это, прежде всего, результат взаимодействия весьма ограниченного числа базовых механизмов. Такими механизмами – фундаментальными элементами – являются пищевое поведение, проявления агрессии (как реакция на угрозу), подражание, индивидуальная пищевая успешность и пр.

Более того, сами этологи относятся с осторожностью к предлагаемым моделям и методам. Вопрос адекватности моделей биологических процессов и явлений – это большая проблема. Так, в [Богатырева, Богатырев, 2013] говорится о том, что вместо описания зачастую имеется предписание желаемых, не имеющих ничего общего с реальными биологическими прототипами свойств создаваемым моделям. Еще одним проблемным моментом является, согласно той же работе Богатыревых, отрицание значимости единичных феноменов, а вместо этого – преувеличение роли статистических моделей. Последнее крайне созвучно основной парадигме исследований. Все

рассматриваемые модели основаны на индивидуальном устройстве агентов и их поведении.

Вообще же, вопрос о том, где и как в предложенных моделях или построенным на их основе систем явным образом проявляется эмерджентность, которая постоянно упоминается в этом исследовании, является непростым. В первую очередь, из-за опасности бесконечных дискуссий от том, где наблюдается аддитивность, а где – эмерджентность. В начале работы был приведен редкий пример явной эмерджентности группы роботов-частиц, способных перемещаться лишь группой. Формально эмерджентность проявляется в самом образовании социума, или в такой форме организации взаимодействия между агентами, которую называют социумом. В биологии социум – это пример явной эмерджентности, в технике – это образование, поведение которого описывается в терминах самостоятельной единицы, без расчленения на составные части. Здесь таковой единицей является многоагентная система, решающая, например, задачу мониторинга, охраны, территориального распределения и т.п. Или система, решающая задачу устойчивого функционирования в течение некоторого времени на ограниченной территории (задача территориального гомеостаза).

#### **4.5.3. О языковых аспектах парадигмы МСП**

Парадигму МСП можно рассматривать не только как множество моделей, методов и алгоритмов, позволяющих организовать группу искусственных агентов (роботов) как социум. Важно то, что этот подход определяет своего рода язык описания искусственных социумов. На нижнем уровне действия и комплексы действий определяются на автоматном языке; характер индивидуального поведения описывается на языке потребностей, эмоций и темперамента; описание взаимодействия индивидов и управления характером поведения всего социума использует понятия типа подражание, эмпатия, доминирование и т.п. Эти конструкты как элементы языка позволяют не только интерпретировать поведение роботов в социальных терминах, но и формулировать задачи проектирования роботов и их систем. Существенным является то, что за каждым термином этого описания стоит реальный механизм или модель (по крайней мере, те, что описываются в настоящем исследовании). Все это придает парадигме МСП конструктивный характер.

#### **4.6. Об устойчивости функционирования**

В работе часто употребляется термин "устойчивость" применительно к функционированию группы агентов или социума. Формальное определение понятия

устойчивости в контексте данной работы является очень неблагодарной задачей. С одной стороны, имеется его вполне определенной интуитивное понимание вроде способности системы возвращаться в исходное состояние после неких "малых" входных возмущений. Однако это не отвечает на вопрос о том, как рассматриваемые механизмы социального взаимодействия обеспечивают эту устойчивость (хотя интуитивно это кажется очевидным). Для этого придется рассмотреть вопрос об устойчивости более строго. Очевидно, что определение устойчивости группы в том смысле, в котором это понимается в теории управления (асимптотическая устойчивость, устойчивость по входу) вряд ли применимо к анализу поведения групповых систем. Попытки изобразить некую абстрактную структурную схему и проанализировать ее "передаточную" функцию приведут просто к выхолащиванию сути вопроса, его вульгаризации. Поскольку речь идет все-таки о биоинспирированных моделях поведения, посмотрим на то, как понимается устойчивость систем в "смежных" областях.

Экономику/социологию рассматривать не будем в силу того, что в этих областях используются излишне абстрактные сущности и понятия. Кроме того, сложно опираться на предметные области, в которых не только существует, но и активно используется оксюморон типа "устойчивого развития" (под ним понимается постоянный рост, хотя формально устойчивость предполагает равновесие, а развитие возможно как раз при выходе системы из равновесного состояния).

Не многим лучше обстоит дело в популяционной экологии. Здесь активно используются понятия устойчивости популяций во времени и пространстве, но в целом рассуждения на эту тему выглядят несколько странно. Обычно рассматривается некая конкретная популяция, существующая на некоторой ограниченной территории и на некотором отрезке времени. Далее перечисляются наблюдаемые механизмы организации внутривидового взаимодействия (когезия, информационный обмен, агрессия и т.п.), рисуются некие схемы (типа схемы популяционной авторегуляции плотности населения у грызунов) и после этого объявляется, что все эти механизмы и определяют условия устойчивости, см., например, работу [Шилов, 1998].

**Когнитивные карты.** Попробуем подойти к этой проблеме с другой стороны. В любом случае, рассуждения об устойчивости будут иметь качественный характер. Одним из интересных механизмов качественного анализа являются т.н. когнитивные карты. Далее мы будем опираться на работы О.П. Кузнецова и А.А. Кулинич, см., например, [Кузнецов, 2009], [Кулинич, 2010]. Когнитивная карта (КК) – это ориентированный граф, ребрам которого поставлены в соответствие веса. Вершины графа соответствуют факторам (концептам), определяющим ситуацию, ориентированные ребра – причинно-

следственным связям между факторами. Веса определяют силу влияния этих факторов. Положительный вес означает, что увеличение фактора-причины приводит к увеличению значения фактора-следствия, отрицательный – к соответствующему уменьшению.

Если веса графа принимают значение +1 и -1, то мы имеем дело со знаковым графом. Важная задача в анализе таких графов – это анализ его циклов. Положительный цикл – это контур положительной обратной связи. Увеличение значения некоторого фактора в этом цикле приведет к его дальнейшему неограниченному росту, т.е. потере устойчивости. Отрицательный цикл противодействует отклонениям от начального состояния и способствует его устойчивости. Знак цикла определяется знаком произведения его ребер.

Опираясь на те или иные представления о факторах, способствующих устойчивости в популяционно-экологическом понимании, мы получим некоторую когнитивную карту. Фрагмент такой условной КК приведен на Рис. 4.15,а. Обозначений на ней вполне достаточно для понимания сути вопроса. На этой когнитивной карте выделен положительный цикл  $N-\rho_N-E_{neg}$ . Это – "плохой" участок КК, он показывает, что может возникнуть ситуация, в которой начнется неограниченный рост конфликтов. Однако, добавляя такой фактор (концепт), как механизм доминирования, мы превращаем положительный цикл (неустойчивый процесс) в отрицательный, см. Рис. 4.15,б.

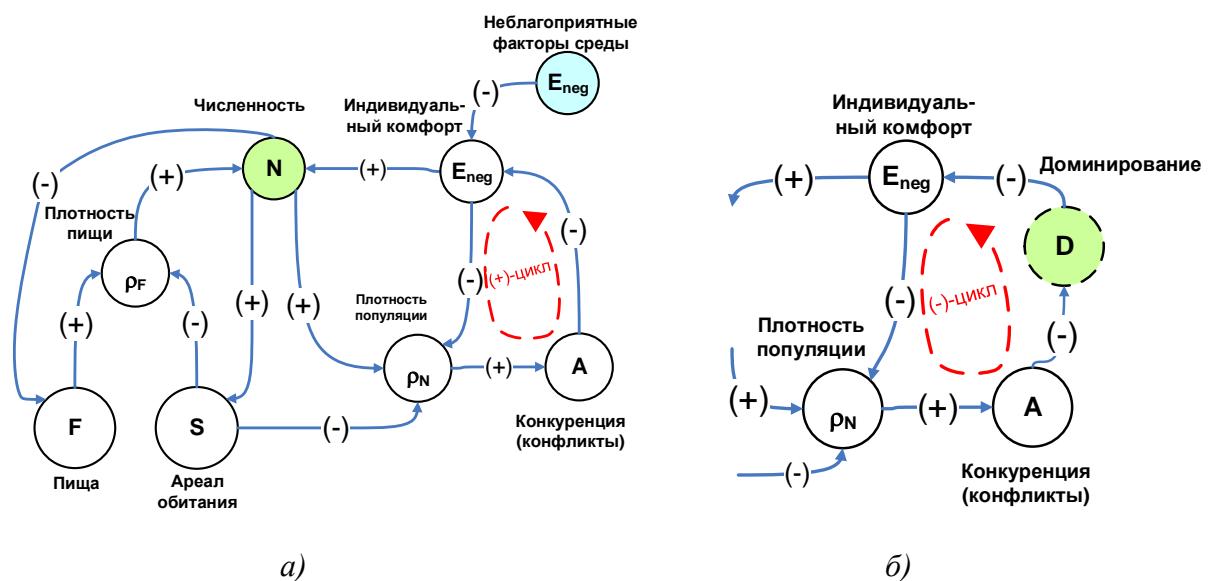


Рис. 4.15. а) карта с положительным циклом  $N-\rho_N-E_{neg}$ , б) фрагмент с введенным элементом  $D$ , превращающим  $(+)$ -цикл в  $(-)$ -цикл

Рассуждая таким образом, мы определим механизмы социального взаимодействия как нечто, способствующее стабилизации процессов как внутригруппового (особь-особь), так и внешнего (особь-среда) характера. Мы сознательно не будем останавливаться на

вопросе структур подобного рода КК. Эти возможные КК будут оперировать самыми разнообразными представлениям о составе факторов и причинно-следственных связях, и мы погрязнем в бесконечных уточнениях, дискуссиях, относящихся к тому же к иной предметной области.

Все это, разумеется, не является строгими доказательствами, но – некоторым формальным обоснованием. Иное в условиях наших качественных рассуждений вряд ли возможно.

**Необходимость и достаточность базисного набора.** Изначально в работе заявлялось о необходимости создания базисного набора моделей поведения, необходимого и достаточного для организации устойчивого функционирования технических систем в естественных средах. В Табл. 4.2 "Функциональное представление механизмов социального поведения" определен базисный набор моделей поведения (узнавание, сопоставление, С.Я., модель мира, эмоции, ...). Этот набор позволяет реализовать все остальные формы и проявления социального взаимодействия (за исключением, разумеется, репродуктивного аспекта). А механизмы социального взаимодействия, как было сказано выше, и служат для обеспечения устойчивости функционирования группы агентов.

#### **4.7. Выводы к главе 4**

Итак, было показано, что в рамках парадигмы МСП решение частных задач групповой робототехники – патрулирование, охрана, разведка, картографирование и др. – должно рассматриваться как частные проявления решения общей задачи: устойчивого функционирования группы агентов на ограниченной территории. Эта задача определяется как задача поддержания территориального гомеостаза.

Такой подход позволил подойти к вопросу создания обобщенной поведенческой модели, основанной на базисном наборе механизмов индивидуального поведения и межагентного взаимодействия.

Кроме того, были обсуждены вопросы управления социумом роботов в рамках парадигмы МСП. Показано, что специфика управления социумом роботов как целостным, устойчивым образованием, сводится к трем основным механизмам: (1) непосредственное управление индивидуальным поведением членов социума, (2) оказание воздействий на среду обитания и (3) управление такими социальными надстройками, как «нравственные» установки. При этом управление индивидуальным поведением может быть основано на использовании механизмов паразитического манипулирования. Именно принципы

паразитического манипулирования позволяют осуществлять такие воздействия, как изменение характера поведения, переориентация и прямое выстраивание реакций. Также важно, что вопросы "морали" (или нравственности поведения) мы постарались рассмотреть не с гуманитарной, а с технической точки зрения.

Кроме того, был рассмотрен ряд общих методологических вопросов парадигмы моделей социального поведения, таких как сама правомерность существования явных базовых фундаментальных механизмов, понятие сложности поведения, наличие критериев эффективности социума искусственных агентов. Несмотря на внешнюю абстрактность этих вопросов, они определяют пути решения совершенно практических задач.

Основными результатами являются следующие:

1. Введено понятие территориального гомеостаза, определяющего ряд специфических способностей системы "группа роботов – среда". Показано, что "стандартные" задачи групповой робототехники являются частными проявлениями решения задачи поддержания ТГ.
2. Определен набор базовых механизмов индивидуального поведения и межагентного взаимодействия. На основе этого базиса предложена обобщенная модель поведения искусственных агентов, способных к образованию социальных сообществ.
3. В рамках задачи управления социумом был предложен ряд моделей управления индивидуальным поведением индивида (агента), основанных на принципах паразитического манипулирования.
4. Обсужден способ управления поведением социума, основанный на использовании метаправил межагентного взаимодействия, которые можно определить как нравственные императивы.
5. На основе модели когнитивных карт была дана интерпретация механизмов социального взаимодействия как факторов, обеспечивающих устойчивость функционирования групп агентов.

## ГЛАВА 5. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Далее будут приведены примеры решения некоторых практических задач, описаны эксперименты, в ходе которых апробировались предложенные в исследовании модели и алгоритмы. Основная задача практической части исследования – не проверка эффективности моделей или сравнение их результатов с известными (специализированные алгоритмы, создаваемые под каждую конкретную задачу, работают всегда эффективнее). Задача заключается в демонстрации того, что предложенные модели, составляющие основу организации социоподобных систем, позволяют решать самый широкий круг задач, претендую на некую общность подходов к решению задач группового управления.

### 5.1. Количественные оценки

Прежде чем перейти к вопросам технической реализации группировки роботов, необходимо разобраться с такими количественными параметрами, как количество роботов в группе, а также параметры территории, на которой эти роботы функционируют. При этом мы будем использовать биоинспирированные подходы, а не оптимизационные методы, обычно принятые в групповой робототехнике (см., например, работу [Нго, Нгуен, Ронжин, 2019], в которой описан метод многокритериальной оценки количества и состава гетерогенных робототехнических комплексов).

#### Количество роботов

Важным моментом является вопрос численности группировки. Фактически, моделируя те или иные аспекты поведения социума, мы явно или неявно подразумеваем, что имеем дело с моделью муравейника, пусть и искусственного. Однако численность муравьиной колонии весьма велика. Отсюда возникает закономерный вопрос: сколько нужно роботов, чтобы проводимые эксперименты не превращались в профанацию?

Обратимся к биологии. Минимальной социальной единицей муравьев является т.н. клан. Его численность зависит от вида, стадии жизни. Для рода *Formica* количество особей в семье-клане колеблется от нескольких десятков до нескольких сотен. Обозначим эту численность через  $N$ . При этом важно, что значительная часть муравьев живет и работает внутри гнезда. Эти внутргнездовые муравьи нам не столь интересны с точки зрения изучения поведения. Другая часть муравьев занимается внегнездовой деятельностью – сбором строительных материалов, транспортировкой грузов, фуражировкой (добычей пищи) и пр. Среди набора внегнездовых функций наиболее

важна с точки зрения моделирования фуражировка. Доля фуражиров в семье невелика и составляет порядка 13% [Захаров, 2015]. Обозначим этот параметр, как  $S$ . Моделирование поведения именно таких индивидов нам особенно интересно.

Таким образом, приняв  $N=100$  и  $S=0.13$ , мы имеем следующую оценочную величину количества активных особей:  $M = N \cdot S = 100 \cdot 0.13 = 13$ .

Это очень грубая оценка, но порядок именно таков. Т.е. для получения адекватных результатов активному моделированию подлежит группа из порядка 10 роботов. Разумеется, нельзя не учитывать мобилизационный ресурс – особей, находящихся внутри гнезда. Именно эти особи восполняют потери среди активных рабочих, именно они и отвечают за собственно транспортировку пищи (если их мобилизуют на это) и пр., но все-таки эти роли уже вторичны.

Следующим важным вопросом из области количественных оценок являются характеристики полигона, т.е. территории, на которой "живут" роботы. Какова его площадь, насколько плотно должны располагаться на нем ориентиры, кормовые участки и пр.

### **Территория**

Каковы должны быть размеры полигона для адекватного натурного моделирования, какова плотность распределения объектов, в частности, тех, которые имитируют корм, и т.п. – это, пожалуй, наиболее сложные вопросы, ответить на которые можно лишь очень приблизительно. Тем не менее, обратимся вновь к биологии.

Важной единицей в мирмекологии является т.н. *индивидуальный поисковый участок* (ИПУ). ИПУ – это фрагмент кормового участка семьи, обследуемый и используемый одним фуражиром при общем вторичном делении территории [Захаров, 2015]. Размеры ИПУ у семей разных видов могут варьироваться. Кроме того, чем «богаче» кормовым ресурсом территория, тем плотнее на ней могут располагаться ИПУ. Непосредственная оценка размера и характеристик ИПУ затруднительна из-за высокой вариабельности, поэтому целесообразнее ориентироваться на искусственные полигоны, которые строят биологи. Согласно оценкам мирмекологов, для содержания и экспериментов с семьей *Formica* численностью 500 рабочих требуется две арены 80x40 см.

**Площадь.** Теперь используем некоторый технический "трюк", против которого сильно возражают биологи, но к которому тяготеют инженеры. А именно, будем оценивать все интересующие нас величины в безразмерном виде. Если характерный линейный размер муравья составляет порядка 0.8 см, то общая площадь будет равна 10000

муравьиных единиц  $(80 \cdot 40 \cdot 2 / (0.8^2) = 10000)$ . В семье из 500 особей имеется 13 процентов активных фуражиров, т.е. 65 особей (см. выше). Следовательно, на каждого из них приходится около 150 единиц площади.

Таким образом, для группировки из 10 роботов, моделирующих активную внешнюю деятельность и имеющих линейный размер порядка 40 см. требуется полигон площадью  $60 \text{ м}^2$  (что соизмеримо с испытательным полигоном лаборатории робототехники Курчатовского института).

**Наполнение объектами.** Оценка насыщенности полигона объектами-ориентирами, плотность "кормовых" зон – это еще более вариабельные характеристики полигона. Здесь вряд ли помогут даже экспериментальные мирмекологические наблюдения. Единственной конструктивной характеристикой здесь может быть только зона видимости объекта подражания – муравья. Согласно наблюдениям этолога Е.Бургова ([Бургов, Малышев, 2019]), примерная дистанция, на которой муравьи *Formica fusca* успешно и быстро обнаруживают добычу, составляет порядка 200-300 мм. В наших безразмерных единицах это означает расстояние в 25-40 линейных размеров.

Для робота *YARP* – основной мобильной экспериментальной платформы – дистанция устойчивого распознавания объекта должна быть порядка 10-16 м., т.е., теоретически, покрывать почти весь полигон. Реальная система технического зрения (СТЗ) робота *YARP* распознать детали (атрибуты) соизмеримого с ним объекта не может. Робот обладает худшим, по сравнению с муравьем, зрением. Это означает, что реальная плотность распределения ориентиров в пространстве определяется только возможностями СТЗ. Ряд важных количественных оценок приведен в работе [Малышев, Бургов, 2020].

## 5.2. Аппаратный базис

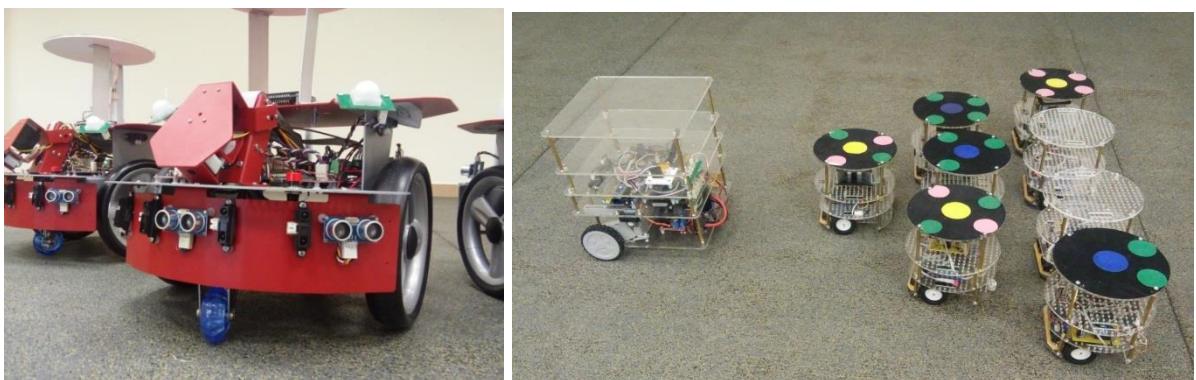
### 5.2.1. Роботы

Апробация рассмотренных выше моделей и алгоритмов проводилась не только на уровне имитационного моделирования, но и на реальных робототехнических системах. Основу экспериментального обеспечения составляли мобильные роботы серий *YARP*, а также модифицированные платформы *DrRobot* ([DrRobot, 2015]). Общая максимальная численность группировки достигала 20 экземпляров, Рис. 5.1.



*Рис. 5.1. Группировка роботов лаборатории робототехники НИЦ "Курчатовский институт"*

Мобильные роботы серий *YARP* представляют собой платформы с дифференциальным приводом. На борту платформ расположены ходовой контроллер архитектуры *TMU*, базовая система датчиков, а также система связи – радиомодуль. В зависимости от задач платформа оснащается бортовой микроЭВМ (на базе *ATmega* или *Raspberry Pi*), системой ИК-связи, дополнительными датчиками и эффекторами, системой технического зрения.



*Рис. 5.2. а) роботы DrRobot, б) роботы серии YARP*

**Примечание.** Название *YARP* (Yet Another Robot Platform) оказалось не оригинальным. Выяснилось, что существует проект *YARP* [YARP, 2015], посвященный созданию программных интерфейсов обмена данными для систем управления роботами. Здесь же *YARP* – это аппаратная архитектура и конструкция семейства роботов. Впрочем, архитектура *YARP* начала разрабатываться в том же 2015 году.

**Архитектура контроллера *TMU*.** Основу бортовой системы управления робота составляет драйвер двигательных функций (ДДФ) на базе микроконтроллера *ATmega* –

*TMU*. Ходовой драйвер управляет двигателями, отвечает за подключение базового набора датчиков (дальномеров) и реализует управляющий интерфейс *rcX*. Схема ходового драйвера приведена на Рис. 5.3.

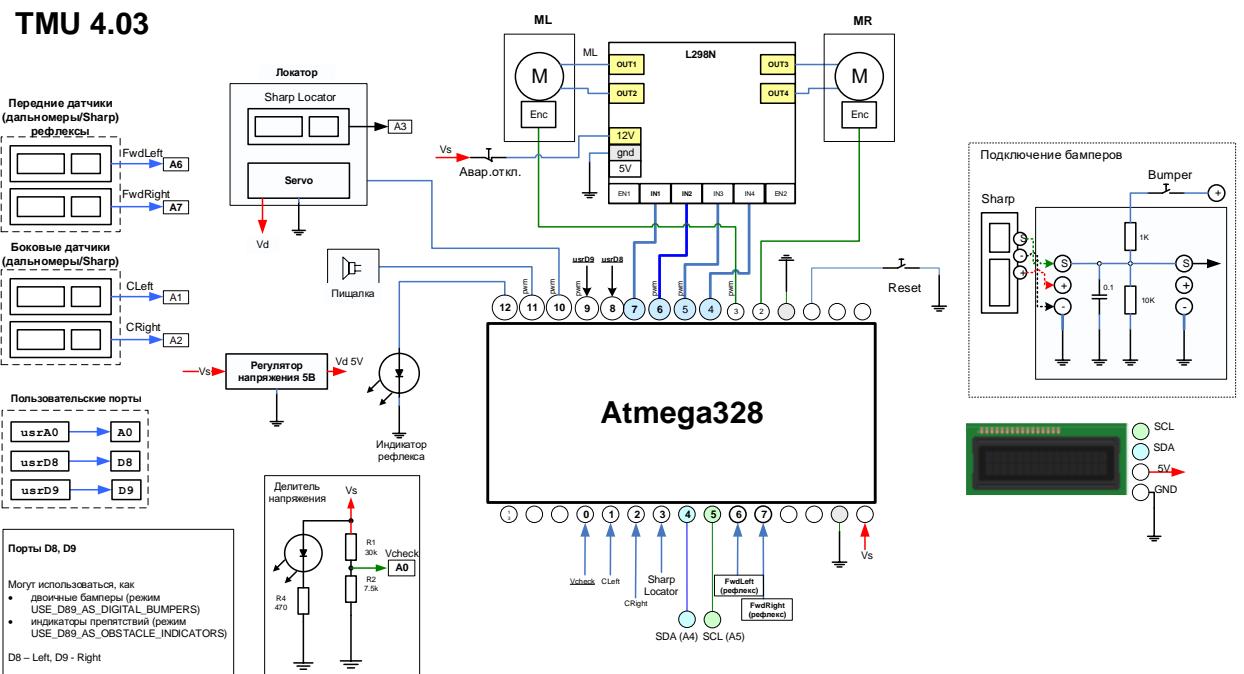


Рис. 5.3 Схема ходового драйвера

Расширение возможностей системы осуществляется путем подключения к ходовому драйверу *i2c*-устройств. Таким образом, контроллер *TMU* представляет собой ходовой драйвер с подключенными сервисными *i2c*-модулями, силовой частью и базовым набором датчиков. На Рис. 5.4 приведена обобщенная архитектура контроллера *TMU*.

Базовый набор датчиков отвечает за рефлекторную реакцию системы на столкновение и контроль уровня заряда аккумулятора.

Протокол *rcX* включает в себя команды управления движением, получение информации о состоянии датчиков системы, а также интерфейс с подчиненными *i2c*-контроллерами.

Для проведения масштабных натурных экспериментов была разработана группировка мобильных мини-роботов, состоящая из трех видов (серий) колесных платформ. Все роботы построены по одним и тем же архитектурным принципам, используют одинаковые протоколы связи и различаются по габаритам и номенклатуре имеющихся на борту сенсоров и исполнительных механизмов.

Унифицированная архитектура системы управления роботов включает в себя драйвер двигательных функций (ДДФ) и множество сервисных контроллеров (СК), отвечающих за обработку сенсорных данных и управление дополнительными

эффекторами. Все СК построены в основном на базе микроконтроллера *ATmega328* и соединены с ДДФ шиной *i2c*. Сам ДДФ построен на основе *ATmega328* или *ATmega2560*. В качестве СК может выступать и отдельный компонент – система технического зрения.

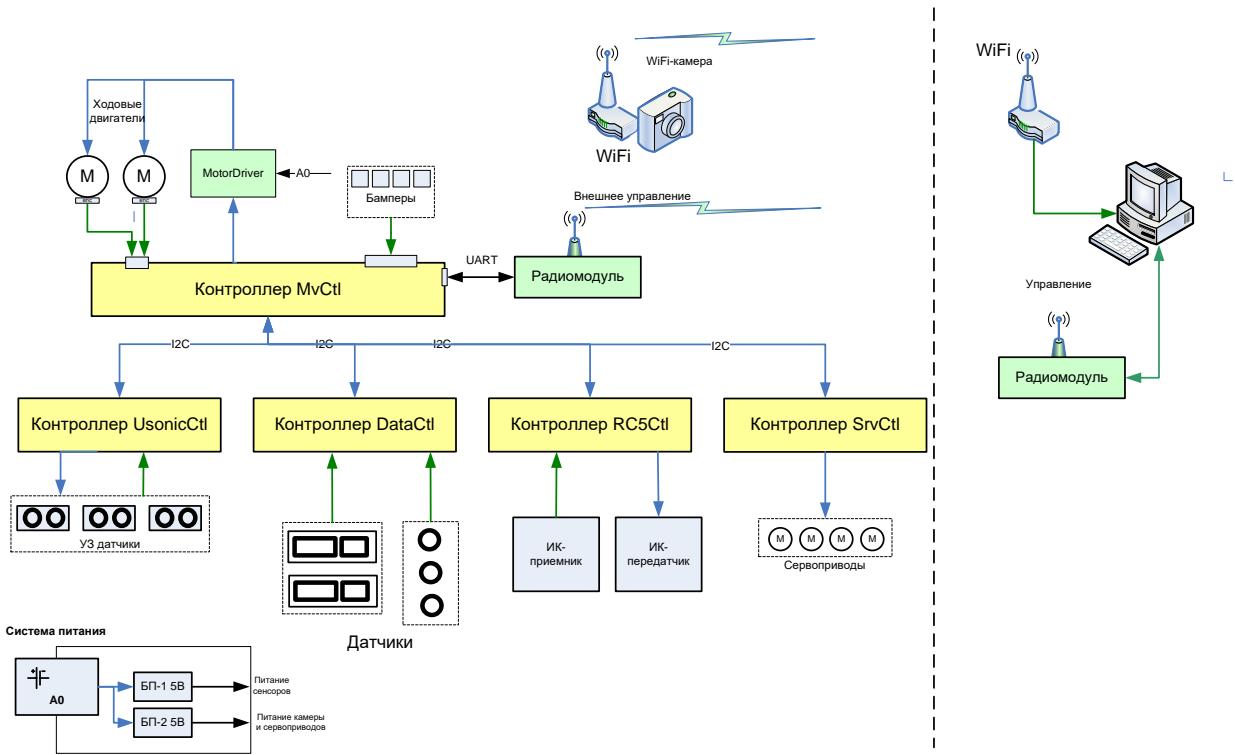


Рис. 5.4. Архитектура TMU

ДДФ обеспечивает работу системы локальной связи и передает (по запросу от контроллера нижнего уровня) принятые данные. “Поведение” миниробота задается верхним уровнем управления, где определены соответствующие реакции, сценарии действий и т.д. Локальная связь представляет собой систему ИК-излучателей и приемников, причем приемники экранированы друг от друга, что обеспечивает направленность приема данных. 12 инфракрасных излучателей обеспечивают широковещательную передачу сигналов. Связь робота с внешним миром в режиме удаленного управления может осуществляться посредством радиомодуля, подключенного либо непосредственно к ДДФ, либо к посреднику – дополнительному бортовому вычислителю (для реализации радиоканала в различных комплектациях использовались радиомодули *APC220*, *BlueTooth*-модули, *Wi-Fi*). Таким образом, ДДФ выполняет функции нижнего уровня управления, связи с периферией и он же отвечает за базовые рефлексы аппаратного уровня.

**Роботы серии YARP-1** (6 шт.). Самая миниатюрная платформа. В основе ДДФ – микроконтроллер *ATmega328*. СК отсутствуют. Сенсорика: 2 дальномера и локатор.

**Роботы серии YARP-2** (10 шт.). В основе ДДФ – микроконтроллер *ATmega2560*. Имеют большие по сравнению с роботами *YARP-1* габариты. *YARP-2* имеет на борту 3 контроллера: контроллер управления верхнего уровня (стратегическое планирование), контроллер управления нижнего уровня (непосредственно управление двигателями, первичная обработка сенсорных данных) и контроллер связи (управление локальной связью). Сенсорика робота: инфракрасные дальномеры *Sharp 10-80см* (4 шт.) и локатор – инфракрасным дальномером на сервоприводе с углом обзора 180°. Имеется возможность дооснащения ультразвуковыми дальномерами.

**Роботы серии YARP-4** (4 шт.). Самые крупные роботы. В основе ДДФ – микроконтроллер *ATmega2560*. Ходовая часть – от платформы *Dr-Robot*. На роботах установлены ip-камеры, передающие данные непосредственно на верхний уровень управления роботом, находящийся на удаленном компьютере по Wi-Fi каналу, имеются датчики света и цвета, позволяющие роботу ориентироваться по специальным линиям, которые находятся на полигоне, а также дополнительные сервоприводы для имитации захватных движений и внешней сигнализации.

Итоговая численность группировки – 20 экземпляров. Разработанные платформы позволили проводить широкий перечень экспериментов в области коллективной робототехники: коллективное управление, картографирование, отработка базовых алгоритмов коллективного поведения и т.д.

**Примечание.** Интересны два факта.

1. Роботы серии *YARP-4* построены на базе канадских платформ *DrRobot*. Через некоторое время эксплуатации *DrRobot* стало очевидно, что целесообразно заменить "фирменную начинку" этих платформ на ДДФ *TMU*, что и было сделано. Это позволило решить проблему совместимости и расширяемости архитектуры.
2. В рамках выполнения НИР "Исследование вопросов создания контрольно-калибровочных полигонов и разработка экспериментального образца аппаратно-программного комплекса сбора и обработки данных для контроля характеристик и калибровки целевой аппаратуры КА ДЗЗ" (шифр: "Мониторинг-СГ-1.3.1.1.1") в 2014-2017 гг. (автор был научным руководителем НИР) была создана, в частности, т.н. "Мобильная платформа для проведения подспутниковых измерений" (права собственности принадлежат АО "Российские космические системы"). Характерно, что базовая архитектура этой платформы (масштабная конструкция, 60 кг.) построена на основе ДДФ *TMU*.

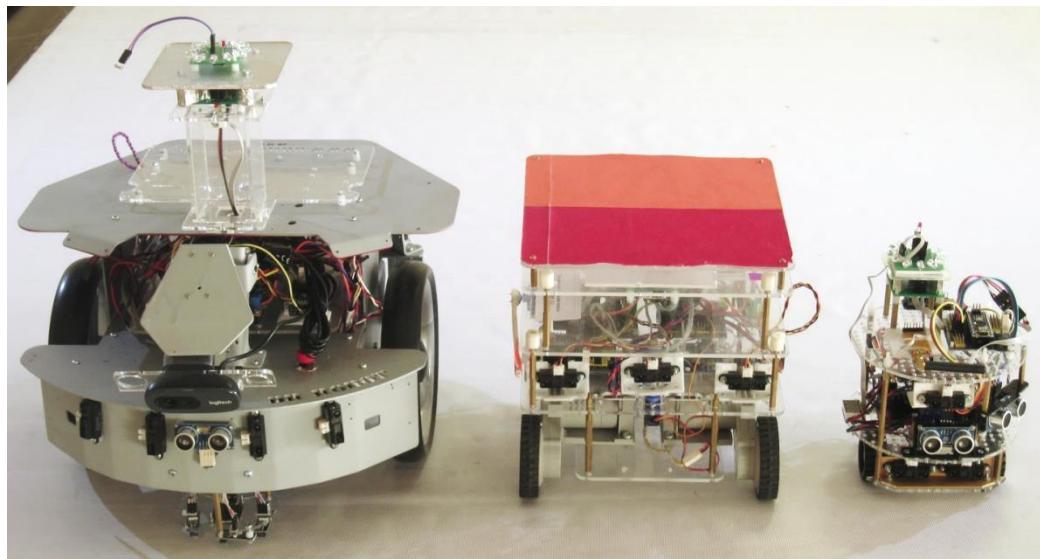


Рис. 5.5. Слева-направо: роботы YARP-4, YARP-2, YARP-1

### 5.2.2. Полигон

Полигон представлял собой площадку размером 10x20 м. с элементами инфраструктуры – препятствиями, ограждениями, маркерами. Использовались маркеры двух видов: маркеры-ориентиры и маркеры на базе ArUco-кодов.

**Маркеры-ориентиры** представляли собой объемные фигуры – разноцветные цилиндры, а также конусы – аналоги морских навигационных знаков, Рис. 5.6,а. Устройство маркеров определялось удобством и простотой их распознавания системой технического зрения. Цветные цилиндры детектировались как множество цветовых пятен, находящихся в определенных пространственных отношениях, а для распознавания навигационных конусов применялись каскады Хаара. Такое решение позволяло устойчиво распознавать маркеры, используя бортовую СТЗ на основе *Raspberry Pi*.

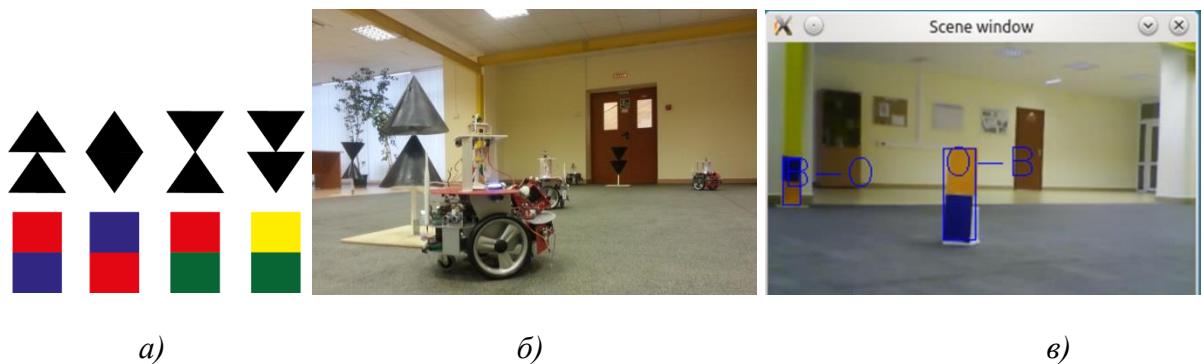


Рис. 5.6. а) форма маркеров для навигации роботов на полигоне, б) робот DrRobot (YARP-4) на полигоне, в) распознанный маркер

**ArUco-маркеры.** Изображения размещались на ограничивающих полигон стендах, а также на гранях препятствий и объектах. Эти же маркеры располагались сверху роботов для контроля их положения.

Разумеется, предварительно была построена и виртуальная модель полигона, для чего использовалась одна из наиболее распространенных систем моделирования робототехнических систем *Gazebo*, Рис. 5.7.

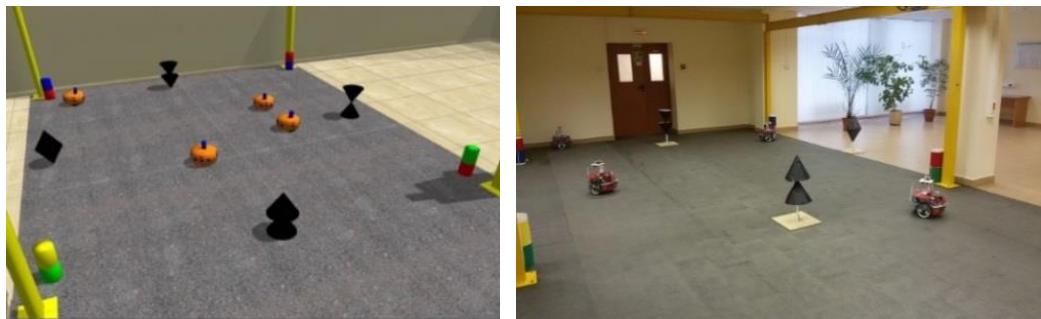


Рис. 5.7. а) Модель полигона в системе *Gazebo*, б) реальный полигон

**Система локализации.** Важным компонентом полигона является система определения местоположения роботов в пространстве. Для этого полигон оснащен видеокамерами, регистрирующими положение роботов по установленным на них специальным цветным маркерам [Воробьев, Мигалев, 2017].



Рис. 5.8. Полигон с системой видеонаблюдения

### 5.3. Моделирование

Обзор и анализ ряда систем моделирования, ориентированных на решение задач коллективной робототехники, показал целесообразность создания специализированного средства моделирования, предназначенного для реализации моделей социального поведения. Существующие системы моделирования можно отнести к трем категориям. Первая – это универсальные системы общего назначения. К ним относятся, прежде всего, система *Gazebo* [Koenig, Howard, 2004] и *Webots* [Cyberbotics, 2016]. Вторая – это системы, ориентированные на моделирование многоагентных систем. Это, например, *AnyLogic* [Borshchev, 2015] и *Repast* [Argonne National Laboratory, 2016]. Третья категория – специализированные системы, ориентированные на моделирование некоторых аспектов поведения насекомых (*Myrmecrome* [Cacace, Cristiani, D'Eustacchio, 2013], *AntMe* [Wendel, 2014] и др.). Детальный обзор этих систем приведен в [Ровбо, Овсянникова, Чумаченко, 2017]. Однако ориентация на модели социального поведения, предъявляет ряд требований к системе. Основными из этих требований являются:

1. Масштабируемость.

2. Поддержка определённого функционала, свойственного агентным системам, и его предоставление в виде библиотек: агент, взаимодействие между агентами, среда, законы взаимодействия со средой, пространство, время.
3. Базовые структуры и механизмы социального поведения:
  - индивидуальные психические различия;
  - выделение иерархической структуры и дифференциация функций;
  - локальное взаимодействие особей и языковая коммуникация.
4. Поддержка создания моделей внутреннего и внешнего мира агента.
5. Поддержка модели из нескольких взаимодействующих коллективов.

Исходя из этих требований, был разработан прототип системы моделирования *KVORUM* [Карпов, Ровбо, Овсянникова, 2018]. Большинство моделей, представленных в настоящем исследовании, были реализованы именно с помощью этой системы (программный код создан автором диссертации, ссылка на репозиторий: [https://gitlab.com/karpov\\_ve/kvorum](https://gitlab.com/karpov_ve/kvorum)).

### 5.3.1. Система KVORUM

Система моделирования *KVORUM* предназначена для симуляции поведения больших групп агентов. Каждый агент снабжен «виртуальными датчиками», имитирующими реальные датчики на роботах, такие как сенсоры, локаторы, суперлокаторы, датчики положения и т.д.

*KVORUM* представляет собой программный инструментарий – эмулятор роботов и среды их обитания. Особенностью системы является наличие интерфейсов, позволяющих управлять как виртуальными агентами, так и реальными техническими устройствами. Настройка на архитектуру конкретной системы управления осуществляется в соответствующих пользовательских программных модулях.

В отличие от систем моделирования, позволяющих симулировать разнообразные физические эффекты, *KVORUM* использует упрощённую физическую модель для экономии ресурсов и ускорения разработки. В частности, исходя из особенностей предметной области, за основу был выбран 2D мир, в котором передвижение агентов и многие взаимодействия геометризованы. Например, действие ультразвуковых и инфракрасных дальномеров моделируется расчётом поведения лучей и оценкой зоны «видимости» датчика. Такой подход позволяет моделировать более крупные группы агентов, сохраняя важные для области элементы и абстрагируя их физические детали.

Система моделирования работает под управлением ОС *Linux (KUbuntu)* и использует инструментарий *ROS (Robot Operation System* – платформа для разработки

программного обеспечения роботов), осуществляющий обмен данными между модулями системы. Модули, сценарии, прикладные подсистемы могут быть написаны на любом поддерживаемом *ROS* языке. Основным требованием является реализация интерфейсов через систему сообщений – т.н. топики.

В основе системы моделирования лежат два модуля – *kvorum\_m* и *kvorum\_v*, образующие ядро системы. Модули написаны на языке *Python*. Основная задача ядра системы – моделирование поведения группы реальных технических объектов. Интерфейсы модулей ядра определены таким образом, чтобы максимально абстрагировать управляющую программу от объекта управления.

На Рис. 5.9 представлена концептуальная схема системы моделирования *KVORUM*, состоящая из ядра системы (расчетный модуль + визуализатор + описание робота и среды), модели робота и прикладных программ. Ядро системы взаимодействует с моделью, имитирующей робота, и прикладными программами через топики: входной (*action\_topic*) и выходной (*ardans\_topic*). Модель, имитирующую робота, состоит из узла управления и логической модели робота *TMU*. Прикладные программы создаются пользователем и определяют функционирование агента.



Рис. 5.9. Концептуальная схема системы моделирования *KVORUM*

Абстрагирование управляющей программы от объекта управления – виртуального или реального робота или группы роботов – обеспечивается способом взаимодействия компонентов ядра с пользовательским приложением, а именно – через обмен сообщениями, Рис. 5.10.

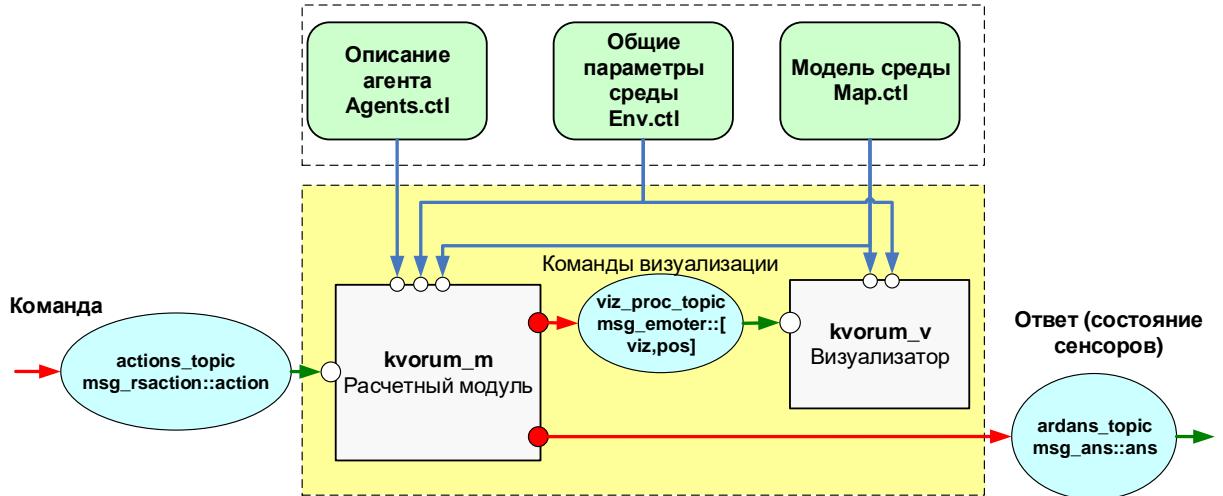


Рис. 5.10. Ядро системы KVORUM

Здесь команды управления движением публикуются в топик *actions\_topic*, а состояние сенсорной системы агента считывается им из топика *ardans\_topic*.

Подобная архитектура обладает важным свойством переносимости кода элементов модели между симулятором и реальными роботами. В частности роботы серии *YARP-1* и *YARP-2* (Рис. 5.11), построенные на основе архитектуры *TMU*, работают по той же управляющей схеме.

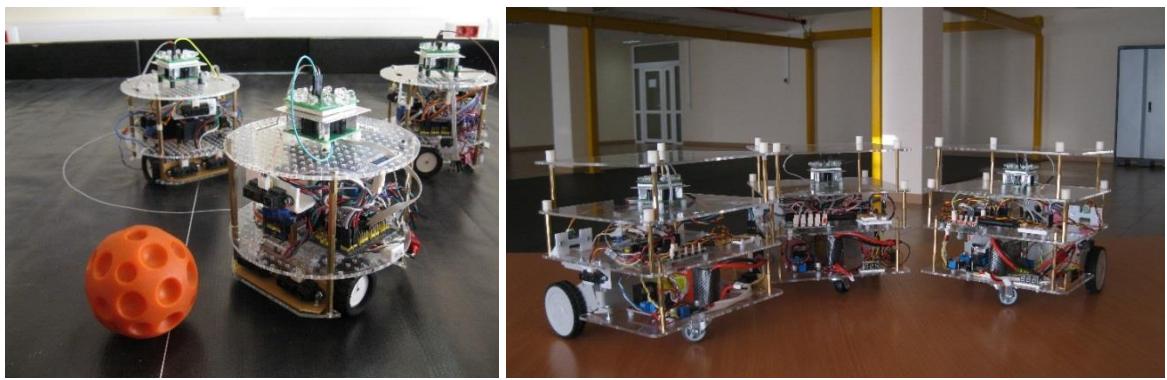


Рис. 5.11 а) роботы серии YARP-1, б) роботы серии YARP-3

### 5.3.2. Архитектура системы моделирования

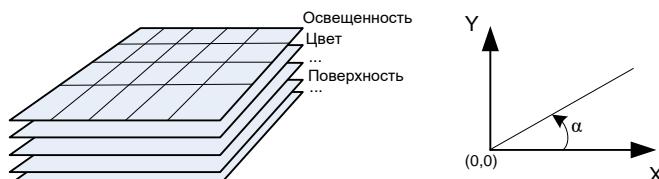
В основе системы моделирования *KVORUM* лежит двумерное представление пространства обитания. Это является удобным упрощением, поскольку многие задачи

групповой робототехники рассматриваются в контексте наземных мобильных роботов. Однако среда, в которой обитают агенты, представляет собой множество слоев, каждый из которых отвечает за представление того или иного физического или логического признака. Это значит, что каждая точка пространства с координатами  $(x, y)$  описывается неким вектором, т.е. среда обитания представлена в виде многомерного массива с измерениями  $[x, y, level]$ . Например, интерпретация слоев, в зависимости от задачи, может выглядеть так (значения *level*):

- 0 (LEVEL\_LIGHT) – освещенность;
- 1 (LEVEL\_COLOR) – цвет поверхности;
- 2 (LEVEL\_IR) – «эфир» (IR-область)
- 3 (LEVEL\_GROUND) – поверхность;
- 4 (LEVEL\_ONBOARD) – бортовой настроечный датчик (фиктивный уровень);
- и т.д.

Имена слоев определены в словарях системы. Такое представление позволяет разнести различные характеристики в отдельные области памяти и явным образом обозначить независимость псевдофизических характеристик среды. Помимо более структурированного представления мира, это также несёт определённые технические преимущества: поскольку разные датчики, как правило, работают с разными характеристиками мира, а значит, разными слоями, то набор измерительных, а также изменяющих действий можно распараллелить, одновременно выполняя в различных потоках операции со слоями. Это также в значительной степени унифицирует эти операции, позволяя обрабатывать схожим образом различные характеристики.

На Рис. 5.12 изображено представление поля в виде слоев.



*Рис. 5.12 Представление поля в виде слоев*

Каждому датчику соответствует свой слой, содержащий информацию о существующих на нем агентах и объектах. При создании датчиков есть возможность изменить значения слоя. Координатные оси представлены декартовой системой. Для реализации процесса коммуникации агент может быть источником сигналов, детектируемых другими участниками в секторах действия соответствующих сенсоров.

**Сенсоры.** Среди моделируемых датчиков отметим локатор (к которому сводимо большинство сенсоров-дальномеров) и т.н. суперлокатор.

**Локатор.** Геометрия датчика определяется параметрами усеченного конуса *cang*, *cR* и его углом ориентации *cdir*, см. Рис. 5.13,а. В зависимости от типа, локатор, настроенный на определенный слой, вернет либо расстояние до ближайшего найденного объекта, либо идентификатор этого объекта, но без расстояния до него.

**Суперлокатор.** Это локатор, возвращаемые значения которого представляют собой вектор пар вида <значение\_сигнала, расстояние>. Это позволяет не только определить расстояния до объектов, но и идентифицировать их. Как и для локатора, необходимо определить соответствие угла и индекса в массиве показаний. Рис. 5.13,б представлена окружность, на которой изображено деление обзора суперлокатора на сектора. Для определения местоположения объекта в секторе берутся граничные значения сектора и далее осуществляется обход элементов массива для нахождения детектированных локатором значений.

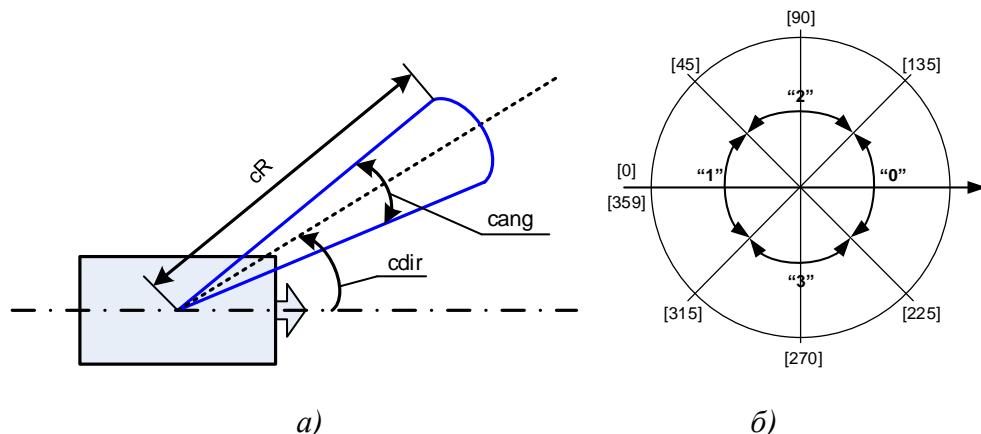


Рис. 5.13 а) локатор, б) суперлокатор: секторные разбиения введены для учета особенностей граничных переходов. В квадратных скобках указаны градусы, соответствующие индексам элементов массива суперлокатора

На практике локатор описывает работу дальномеров, а суперлокатор – работу камеры.

**Расчётный модуль *kvorut\_m*** отвечает за пошаговое моделирование состояния системы и обеспечивает интерфейс между агентами и запросами пользователя: получение данных от сенсорики агента, задание скорости поступательного и вращательного движения агента, удаление, инициализация агентов, отрисовка и инициализация системы моделирования.

Основная часть работы расчетного модуля – это моделирование работы сенсоров агента. Для этого используется известный алгоритм Брезенхема, определяющий

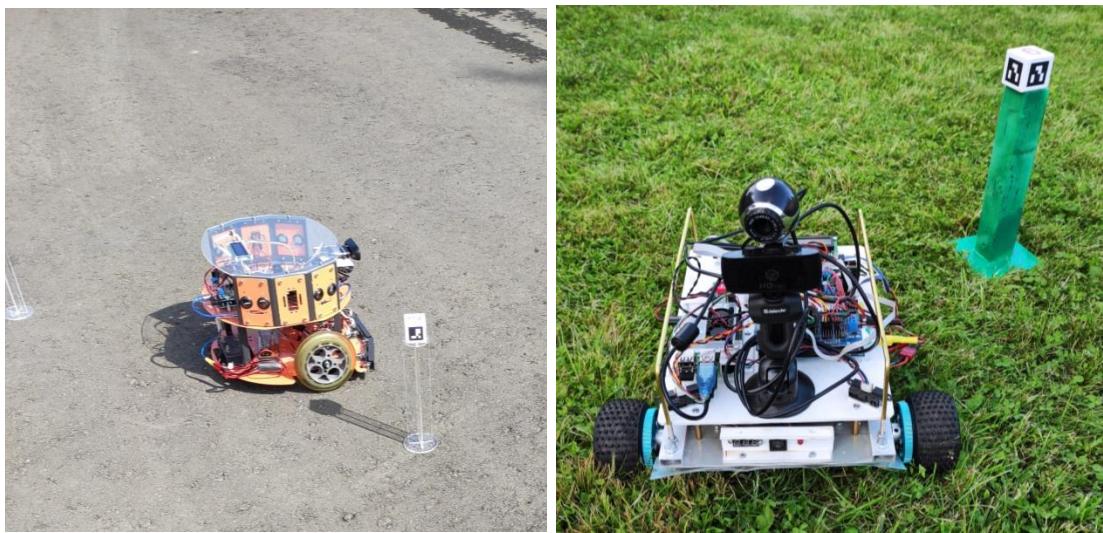
дискретное приближение линии между заданными точками. По сути, моделирование работы локатора заключается в построении множества линий, задаваемых конусом, и в определении того, какие объекты оказались на пути этих линий. Фактически это – постоянное "рисование" на соответствующих сенсору слоях поля моделирования. "Рисуются", в зависимости от типа датчика, либо прямые линии, либо дуги окружности.

Временная сложность такого подхода оценивается как  $O(d^2)$ , где  $d$  – характерный размер области видимости датчиков робота.

*Модуль визуализации kvorum\_v* обеспечивает отображение карты и агентов на экране. Отображение состояния среды происходит по запросу.

Для переноса системы управления на реальных роботов необходимо выполнить дополнительную настройку и использовать специфический для робота узел, обеспечивающий нужный интерфейс – узел *ardsrv*. Он переводит унифицированные команды, передаваемые через *actions\_topic*, в сигналы, воспринимаемые роботом. В случае с роботами серии *YARP* эти команды переводятся в соответствующий формат и пересылаются через беспроводную связь на бортовые вычислительные устройства, исполняющие их. Ответ, приходящий от роботов узлу *ardsrv*, транслируется обратно в унифицированный формат и передаётся системе управления через *ardans\_topic*. Таким образом, модули системы моделирования подменяются на модуль драйвера робота, а топики связи остаются неизменными вместе с остальной частью системы.

Важным является то, что соблюдение принципов мета-автоматного описания поведения агентов позволило прозрачным образом переносить сложные модели поведения агентов из модельной среды *KVORUM* на реального робота, причем без необходимости наличия физического описания среды моделирования. На Рис. 5.14 изображены роботы серии *YARP-13*, работающие в уличных условиях (на асфальте, на траве).



*Рис. 5.14. Роботы серии YARP-13, на которых отрабатывались задачи по запоминанию и воспроизведению маршрута по системе сложных ориентиров*

Абстрагирование заключалось прежде всего в том, что управляющие (автоматные) алгоритмы не использовали привязки к физическим параметрам (скорость, расстояние в физических единицах и т.п.), а поведение описывалось автоматами вида "*Обойти препятствие*", "*двигаться к ...*", "*определить ориентир*" и т.п. Для прикладной программы общий цикл моделирования поведения выглядит весьма прозрачно:

```
-- цикл по всем агентам
for r in Robots do
    r.RequestAllSensors() -- Запрос сенсорной информации
    r.FSM_Logic() -- Отработка шага управляющих автоматов
end for
'визуализация состояния агентов'
```

Перейдем далее к содержательным поведенческим задачам, которые были реализованы на описанном выше программно-аппаратном базисе. Часть этих задач решалась на модельном уровне (в основном, это задачи, связанные с широкомасштабными и длительными экспериментами), решение иных задач демонстрировалось на реальных робототехнических устройствах.

## **5.4. Проект "Кибермуравейник"**

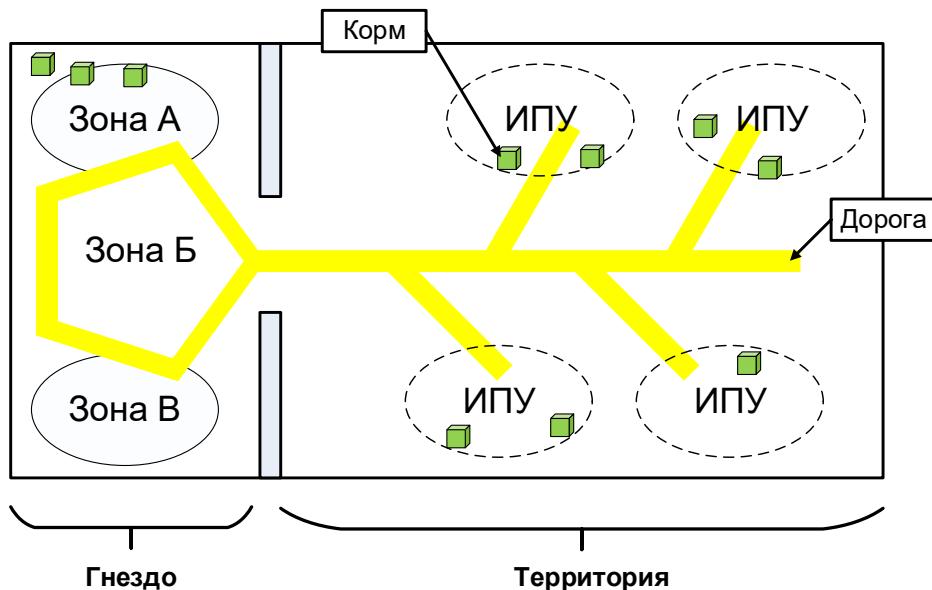
### **5.4.1. Общая схема**

Апробация разработанных моделей осуществлялась в рамках проекта "Кибермуравейник". Основная задача проекта заключалась в реализации комплексного группового поведения роботов, имитирующих пищевое поведение насекомых. Акцент на пищевом поведении был сделан, прежде всего, из соображений наглядности, хотя, строго

говоря, речь идет о задаче из класса поддержания территориального гомеостаза. Кроме того, пищевое поведение может интерпретироваться как задача поддержания энергетической автономности группы роботов.

В работе над проектом "Кибермуравейник" принимали участие сотрудники лаборатории робототехники НИЦ Курчатовский институт, среди которых особо следует отметить В.В. Воробьеву (аппаратная часть), А.Д. Московского и М.А. Ровбо (системный уровень ROS, моделирование), П.С. Сорокоумова (управление), Е.В. Бургова (этологические модели) и А.А. Малышева (реализация моделей поведения).

На Рис. 5.15 изображена схема полигона. Полигон состоит из двух частей – "гнезда" и прилегающей к нему территории. Гнездо, в свою очередь, разбито на три зоны – зону складирования добытой пищи (Зона A), зоны, где собираются на выход агенты (Зона Б), и зоны мобилизации (Зона В), где находятся не занятые сбором пищи агенты. На прилегающей территории пища располагается на т.н. индивидуальных поисковых участках (ИПУ).



*Рис. 5.15. Схема полигона проекта "Кибермуравейник". Здесь ИПУ – индивидуальные поисковые участки, на которых агенты осуществляют сбор пищи; Зона A – место складирования принесенной пищи; Зона Б – зона выхода из гнезда; Зона В – мобилизационная зона*

В рамках проекта "Кибермуравейник" решение общей задачи пищевого поведения складывалось из реализации следующих подзадач:

1. Индивидуальный поиск пищи.
2. Групповая фуражировка (мобилизация).
3. Стаяная охота (реакция на "чужака").

4. Распределение роботов по ИПУ (исследование территории).

### **5.4.2. Архитектура программно-аппаратного комплекса**

Полигон, как уже говорилось выше, оснащен множеством камер. После процедуры их предварительной калибровки получается зона, целиком покрытая системой наблюдения.

Задача системы видеонаблюдения – отслеживать местоположение всех роботов. Для этого роботы оснащены т.н. *ArUco*-маркерами, не требующими для распознавания серьезных вычислительных ресурсов. Помимо собственно координат маркеров определяются и углы их ориентации.

Архитектура бортовых СУ роботов была описана выше. Бортовой вычислитель – это одноплатная ЭВМ *Raspberry-Pi*. Робот оснащен видеокамерой, множеством ИК-дальномеров, а также датчиками цвета. Последние необходимы для реализации процедуры движения робота по дороге – контрастной полосе. На бортовой ЭВМ робота развернута система *ROS*, реализующая унифицированный интерфейс прикладных программ с аппаратным уровнем через систему сообщений, оформленных в виде т.н. топиков (*topics*), чем-то напоминающих доски объявлений.

Основной сервер системы нужен для интеграции в единую систему информации, поступающей от роботов, а также видеопотока от камер наблюдений. Сервер так же использует *ROS*, при этом связь *Wi-Fi* обеспечивает подключение топиков бортовых СУ к единому пространству *ROS*. Такая централизация не затрагивает локального характера поведения роботов и нужна для решения двух задач:

1. Создание единой системы мониторинга и внешнего отладочного управления.
2. Реализация ряда функций, которые на начальном этапе не очень удобно перекладывать на бортовой вычислитель. К таким функциям относятся, например: определение угла ориентации робота, движение между зонами гнезда, возврат на дорогу и т.п.

Архитектура комплекса представлена на Рис. 5.16.

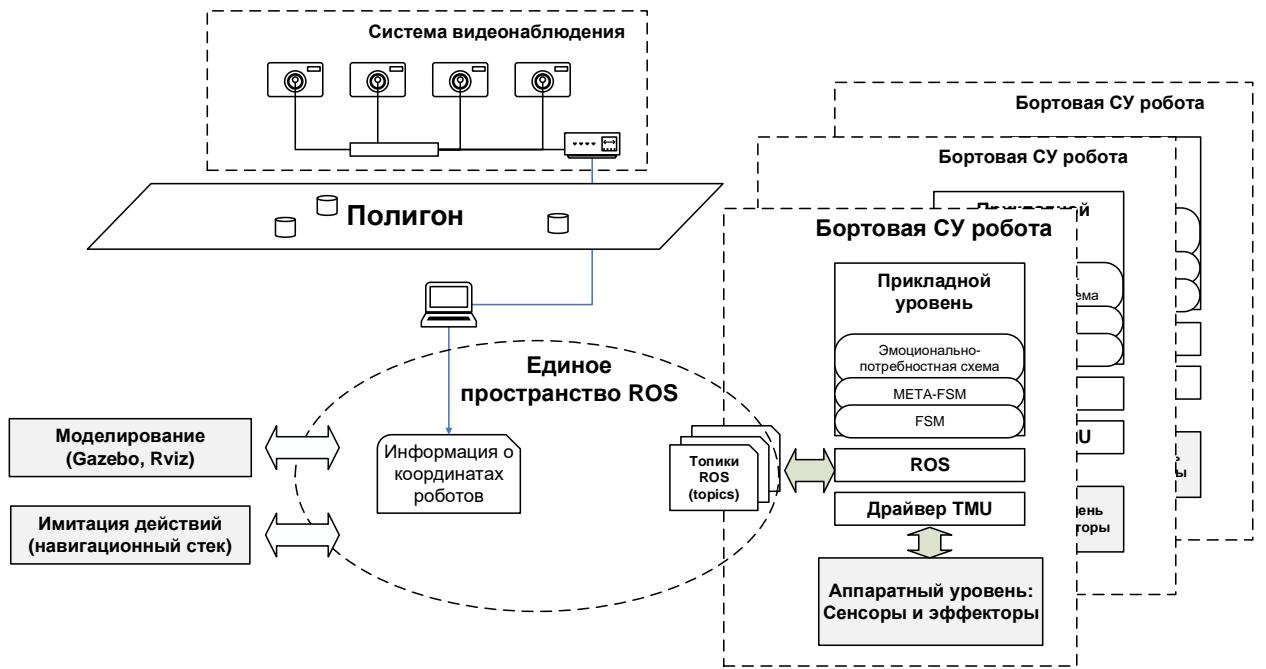


Рис. 5.16. Архитектура программно-аппаратного комплекса "Кибермуравейник"

Прикладной уровень СУ робота состоит из множества конечных автоматов, ответственных за реализацию действий. Перечень автоматов приведен в Табл. 5.1.

Табл. 5.1. Автоматы (действия)

№	Название	Описание
<b>Элементарные движения</b>		
1.	fsm_Stop	Останов.
2.	fsm_Fwd	Движение вперед.
3.	fsm_Left	Поворот налево.
4.	fsm_Right	Поворот направо.
5.	fsm_SetAng	Установить направление (ориентацию).
<b>Сложные движения</b>		
6.	fsm_MoveSpiral	Движение по спирали.
7.	fsm_Pause	Сон в течение времени (начальная пауза).
8.	fsm_Sleep	Сон до бесконечности.
<b>Рефлексы</b>		
9.	fsm_Reflex	Рефлекс на препятствие.
10.	fsm_ObstDet	Реакция на препятствие (до того, как отработает рефлекс), т.е. избегание.
<b>Поисковые автоматы</b>		
11.	fsm_SearchFood	Поиск пищи.
12.	fsm_SearchObj	Поиск объекта.
13.	fsm_SearchShadow	Поиск тени.
14.	fsm_SearchRoad	Поиск дороги.
15.	fsm_SearchRoadSideLeft	Поиск дороги левыми боковыми датчиками.
16.	fsm_SearchRoadSideRight	Поиск дороги правыми боковыми датчиками.
17.	fsm_MoveRoadSideLeft	Движение по дороге левым боком.
18.	fsm_MoveRoadSideRight	Движение по дороге правым боком.
<b>Поведенческие автоматы</b>		
19.	fsm_GoTo	Движение в точку $x, y, ang$ ( $ang$ – финальная ориентация робота).
20.	fsm_Eat	Поедание пищи.
21.	fsm_Walk	Свободное блуждание.
22.	fsm_Attack	Атака (имитация нападения).
23.	fsm_EscapeFriend	"Убегающий" от опасности (от своего робота) автомат.

<b>№</b>	<b>Название</b>	<b>Описание</b>
24.	fsm_EscapeFoe	"Убегающий" от опасности (от чужого робота) автомат.
25.	fsm_Hunter	Логика поведения охотника.
26.	fsm_Victim	Логика поведения жертвы.
<b>Работа со сценами</b>		
27.	fsm_LookAround	Осмотр на месте. Сбор информации.
28.	fsm_EstimateScene	Оценка состояния. Определяется уровень готовности защищать участок.

Поведение робота определяется как последовательность действий (ФКД). Для этого используются мета-автоматы, "действием" или выходом которых является активизация автоматов. В Табл. 5.2 приведен список некоторых мета-автоматов. Там же фигурирует и  $M^2$ -автомат, задача которого состоит в активизации мета-автоматов.

Табл. 5.2. Мета-автоматы

<b>№</b>	<b>Название</b>	<b>Описание</b>
1.	meta_fsm_Stop	Останов (для сохранения методологии управления).
<b>Пищевое поведение</b>		
2.	meta_fsm_FoodBehavior	Комплексное поведение, включающее движение по дороге и взаимодействие с другими агентами.
3.	meta_fsm_SearchEatFood	Комплексное поведение. Поиск и поедание пищи.
4.	meta_fsm_SearchObj	Поиск объекта.
<b>Прикладные задачи. Движение по точкам</b>		
5.	meta_fsm_ExecPlan	Исполнение плана движения по точкам без объезда препятствий.
6.	meta_meta_fsm_ExecPlan2	Исполнение плана движения по точкам с объездом препятствий.
<b>Верхний уровень</b>		
7.	meta_meta_fsm_Emo	Ядро эмоционально-потребностной схемы, организованной в виде автомата.

Верхний уровень СУ – это эмоционально-потребностная система. На выходе системы – активизация автоматов или мета-автоматов, реализующих ту или иную поведенческую реакцию системы. В перечень потребностей, наряду с естественными или

"вitalными", введена искусственная – потребность в охране территории. Она введена для удобства представления прикладной реакции – охраны территории, т.е. реакции на "чужака". В целом же номенклатура поведенческих реакций и потребностей отвечает одному из вариантов типизации поведения, согласно которому есть лишь 4 его базовые формы: *пищевое, оборонительное, половое и исследовательское*, [Лурия, 2007]. Поскольку мы имеем дело с эусоциальным сообществом, в котором репродуктивные функции являются опциональными, половые формы поведения выпадают из рассмотрения.

На Рис. 5.17 представлена рабочая эмоционально-потребностная схема системы управления верхнего уровня, а на Рис. 5.18. – изображение рабочего окна, позволяющего контролировать эмоциональное состояние робота.

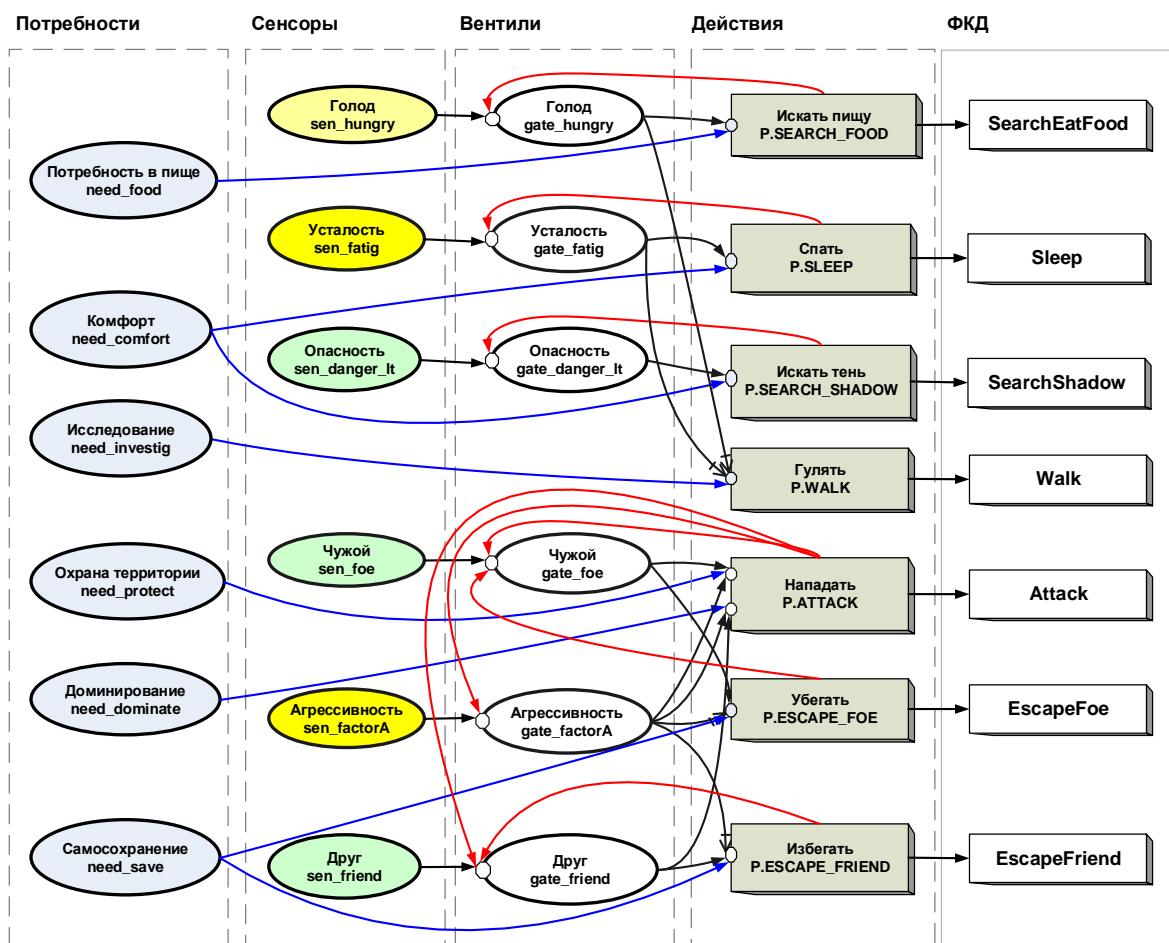


Рис. 5.17. Эмоционально-потребностная архитектура анимата для проекта "Кибермуравейник"

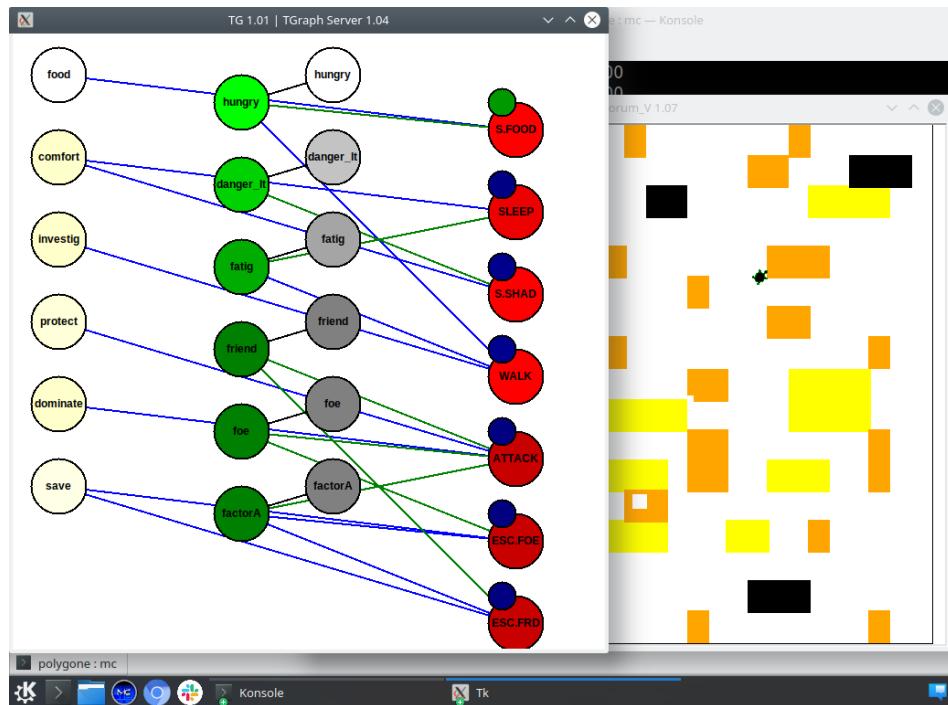
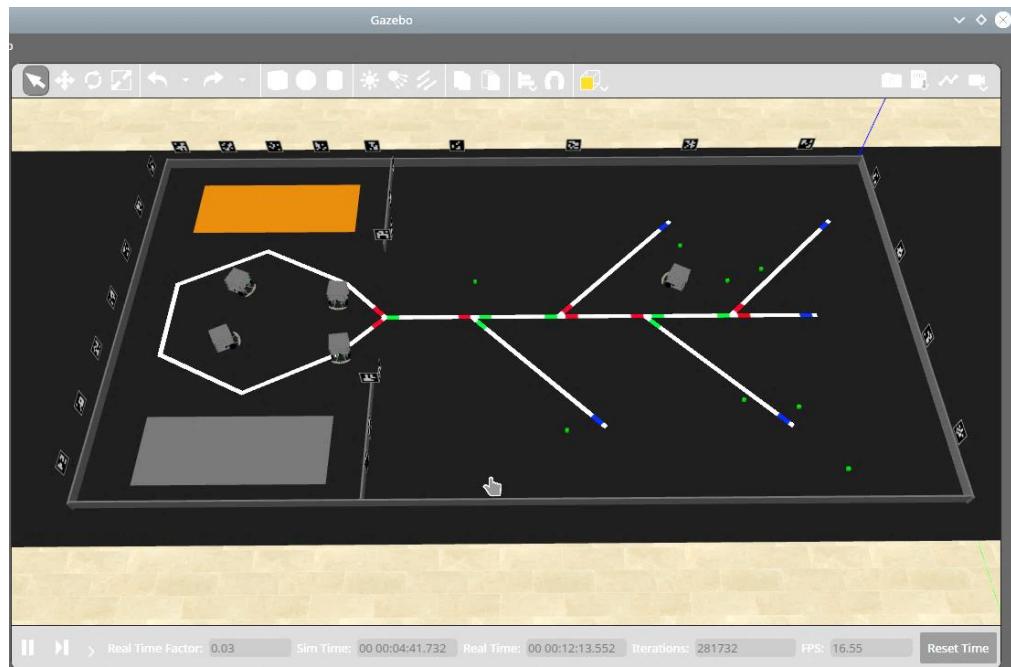
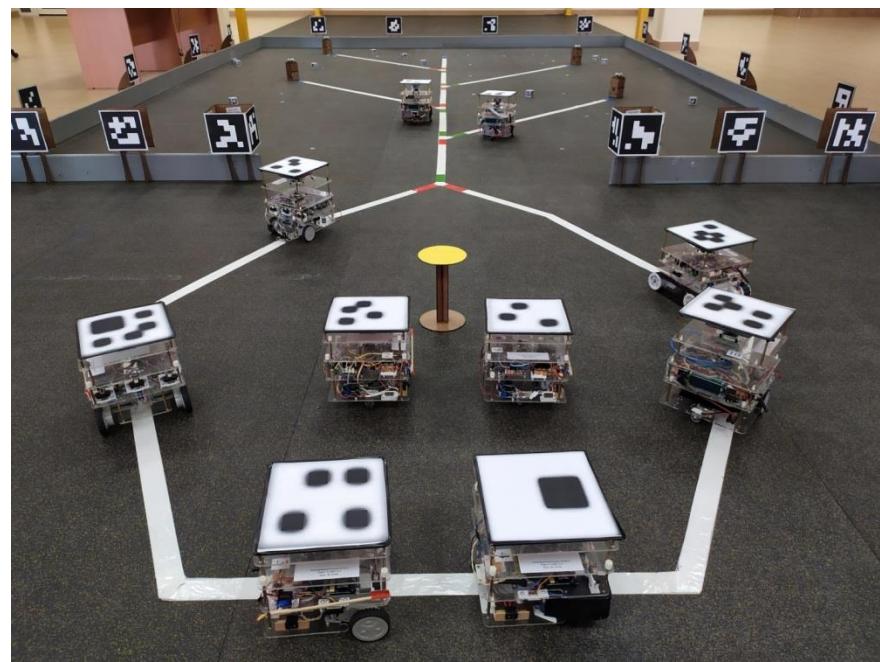


Рис. 5.18. Рабочее окно. Контроль эмоционального состояния

Изображения модельного и реального полигонов представлены на Рис. 5.19 и Рис. 5.20 соответственно. Для удобства все ориентиры представлены *ArUco*-маркерами. Этими же маркерами отмечены грани кубиков – "еды", которую собирают роботы с помощью захватного устройства. Действия, связанные с подъездом к обнаруженной еде и ее захватом, реализованы в виде фиксированных процедур. Здесь следует отметить, что все прикладные действия, совершаемые роботами, имеют автоматное представление – либо в виде сложного автомата, либо автоматной "обертки" системных процедур, реализуемых на уровне стека *ROS*. Это сделано для унификации процедуры управления и работы трехуровневой автоматной системы (автомат  $\leftarrow M^1$ -автомат  $\leftarrow M^2$ -автомат).



*Рис. 5.19. Моделирование в системе Gazebo*



*Рис. 5.20. Полигон проекта "Кибермуравейник". Полная группировка роботов серии YARP-2*

Экспериментальная группировка состояла из 6 роботов основного состава. Этого количества достаточно для адекватного моделирования процесса фуражировки. Размеры исследуемой территории, зоны видимости и количественный состав определены в соответствии с оценками, приведенными в работе [Малышев, Бургов, 2020].

## 5.5. Задачи проекта "Кибермуравейник"

На базе разработанного программно-аппаратного комплекса был решен ряд таких комплексных показательных задач как: (1) распределение роботов по участкам; (2) процедура мобилизации; (3) исследование территории или поисковое поведение.

Моделирование проходило в три стадии:

1. Моделирование в системе *KVORUM*.
2. Моделирование в среде *Gazebo*.
3. Физическое моделирование на реальном полигоне.

Система моделирования *KVORUM* предназначена для реализации задач верхнего уровня. На *KVORUM*-моделях отрабатывались стратегии поведения: работа эмоционально-потребностной архитектуры, автоматы (мета-автоматы), частично – сложные действия. Далее автоматы переносились в модель *Gazebo*.

В среде *Gazebo* отрабатывались низкоуровневые механизмы и элементы поведения в условиях, приближенных к реальным. Финальным этапом являлась отработка и окончательная доводка моделей уже на реальной группировке роботов.

Такая трехуровневая система была необходима прежде всего для минимизации затрат ресурсов, требуемых для моделирования. Если отношение модельного к физическому времени (*RTF* – Real Time Factor) в системе *KVORUM* достигало порядка 10, то в системе *Gazebo* величина *RTF* опускалась до 0.03. Физическое время цикла фуражировки на реальном полигоне составляло порядка 15-20 минут. В *Gazebo* на это уходило порядка 8 часов. Именно поэтому методологически схема выстраивалась так:

- отработка в системе *KVORUM* общей канвы модели и высокоуровневых элементов поведения;
- отработка в *Gazebo* отдельных функций и действий (захват, коммуникации, ориентирование по маркерам);
- проведение экспериментов на реальных роботах.

**Состояние агентов.** Все приведенные задачи требовали распознавания состояния агентов. При этом состояние включало в себя (1) указание кода или имени агента, используемого для определения степени близости наблюдаемого агента (свой-чужой), (2) определение уровня эмоционального состояния и (3) определение текущей активной поведенческой программы. Таким образом, состояние агента *C* – это тройка

$$C = \langle N, E, P \rangle \quad (5.1)$$

где  $N$  – имя (код) агента,  $E$  – эмоциональное состояние,  $P$  – код текущей поведенческой программы.

Поскольку распознавание состояния агента не входило в основной перечень задач исследования, то был использован следующий технический прием. Роботы были снабжены ИК-маяками и приемниками. Маяки генерировали 11-разрядные пакеты протокола RC5 с частотой 5 Гц. Пакеты, формат которых приведен ниже, кодировали состояние агента.

Табл. 5.3. Формат генерируемого пакета:

Разряды пакета (поля)		
0 – 3	4 – 7	8 – 10
Код агента <b>N</b>	Эмоциональное состояние <b>E</b> . Разряд 4 – знак эмоции	Код поведенческой процедуры <b>B</b>

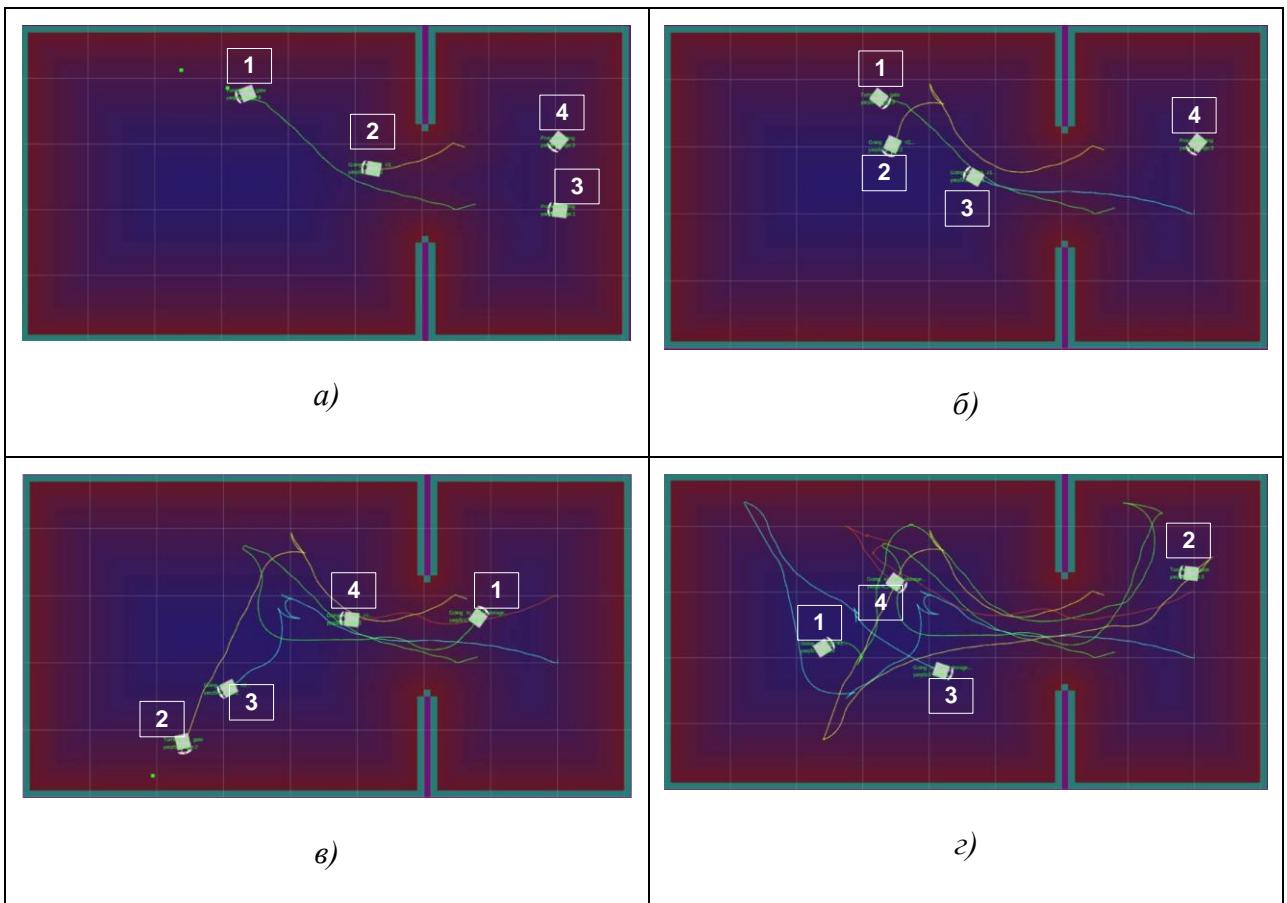
### 5.5.1. Распределение роботов по индивидуальным участкам

Теоретическая основа задачи – модель территориального распределения агентов, описанная в разделе 4.1.3 "Постановка содержательной задачи". Базовый механизм управления – мета-автомат. Фактически, здесь речь идет о реализации сложной поведенческой процедуры или ФКД, не требующей когнитивного уровня организации.

Были отработаны следующие основные технические задачи уровня действий:

1. Навигация по отмеченным дорогам (поиск, возвращение на дорогу, возвращение на базу).
2. Распознавание окружения (определение степени знакомства с участком).
3. Манипуляционные функции: захват и транспортировка "пищи" (кубиков с *ArUco*-кодами).
4. Сигнальная коммуникация. Здесь уровень агрессивности определялся значением поля  $E$  генерируемых сигналов состояния.

На Рис. 5.39 показаны снимки имитационной модели с треками движения аниматов. Аниматы имеют разный возраст (чем меньше номер, тем он младше). Первыми на маршрут выходят молодые.



*Рис. 5.21. Фазы распределения по участкам. а) начальный этап: первым на маршрут выходит самый младший анимат "1", б) анимат "2" изгоняется аниматом "3", в) анимат "4" выгоняет анимата "3"; анимат "1", собрав пищу, возвращается на базу, г) анимат "1" вновь выходит на маршрут, анимат "4" заканчивает сбор пищи и начинает движение на базу*

Физическое время исполнения показанного этапа составляет порядка 5-10 минут в зависимости от успешности исполнения роботами самой проблемной операции – захвата кубика-пищи. В целом энергетических ресурсов роботов хватает примерно на 30 минут работы. Это означает, что реальные физический эксперименты могли отрабатывать от 3 до 5 циклов сбора пищи (от выхода с базы до возвращения).

### 5.5.2. Мобилизация

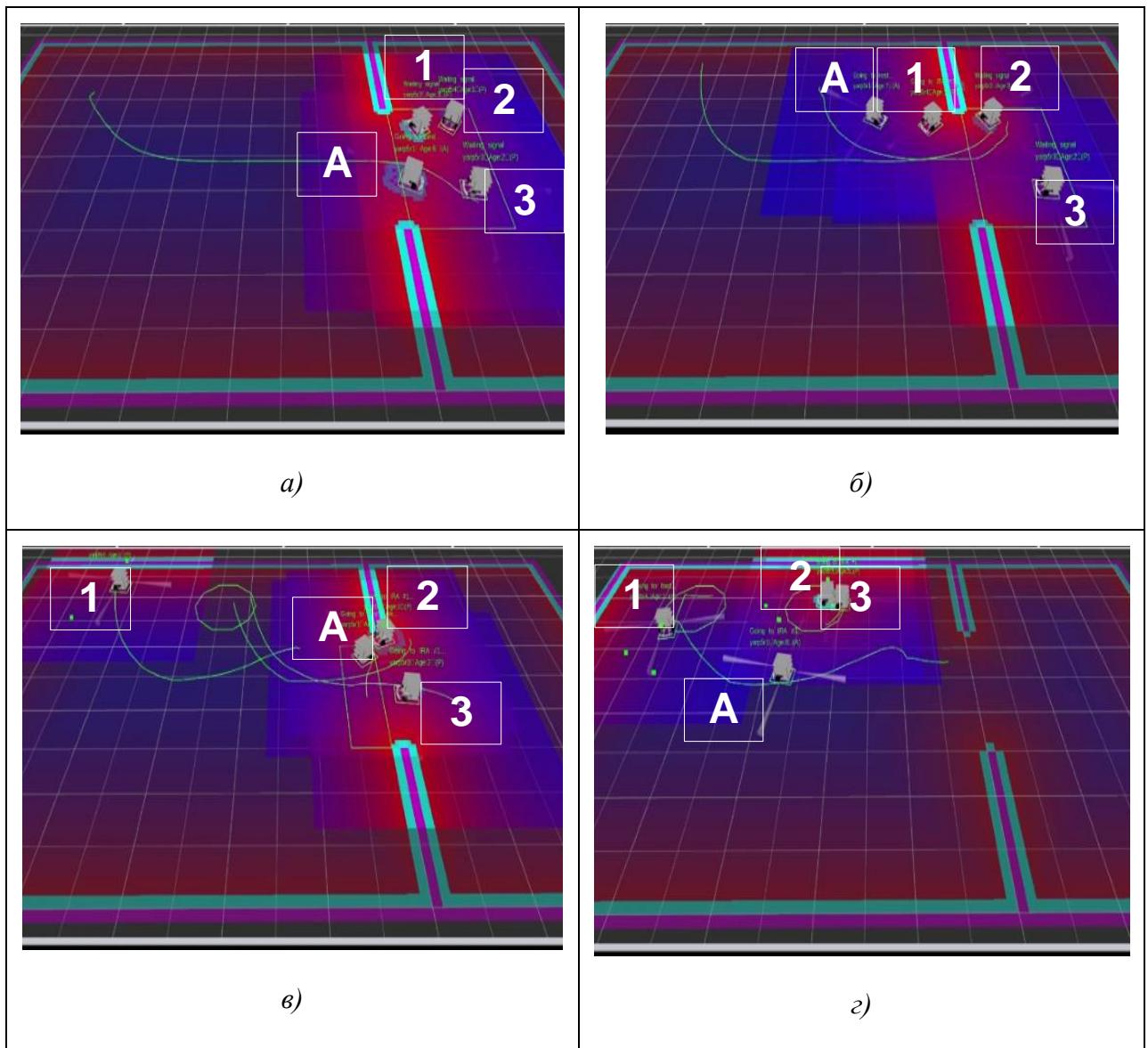
Содержательная постановка задачи заключается в том, что активный агент (разведчик), найдя целевой объект, возвращается на базу (в гнездо) и активирует поисковые процедуры находящихся там пассивных фуражиров. Целевым объектом может быть не только пища, но и обнаруженный "чужой". Основная цель задачи мобилизации – отработка внешнего включения поведенческих процедур.

Отрабатывались три режима мобилизации:

1. Собственно мобилизация (адресная мобилизация) – активация пассивных фуражиров с информированием их о целевых индивидуальных поисковых участках.
2. Активация (безадресная мобилизация) – активация пассивных фуражиров без указания цели. Как вариант – активация защитной реакции.
3. Стайное поведение.

**Примечание о терминологии.** В мирмекологии при описании группового поведения не используется понятие «стая». К группе рабочих, действующих на кормовом участке совместно, скоординированно, применяются термины «группа», «коалиция», «эскадрон» и т.д., но не «стая». Использование данного термина здесь связано с робототехническими традициями. В робототехнике понятие групповой деятельности трактуется очень широко – от деятельности слабосвязных систем до систем с централизованным управлением. Поэтому слово "стая" подчеркивает наличие лидера и ведомых.

**Мобилизация.** В этом режиме пакет-состояние активного фуражира (разведчика) содержит номер активизируемой программы (поле *B*) и номер целевого участка (поле *E*). При получении призывного сигнала у пассивных фуражиров включается соответствующая программа движения. Суть подзадачи – отработка сугубо технических механизмов. На Рис. 5.22 показаны некоторые фазы адресной мобилизации.



*Рис. 5.22. Фазы мобилизации. а) активный фуражир А возвращается на базу и информирует пассивных фуражиров о найденном участке; б) на сигнал реагирует пассивный фуражир I; агент А продолжает поиск; в) агент А, найдя обильный ИПУ, информирует оставшихся агентов; г) агенты 1,2 и 3 работают на участках, агент А продолжает разведку*

**Активация.** Содержательно это интерпретировалось как подача сигнала общей тревоги. Поле *B* определяет включение программы патрулирования. Пассивные фуражиры выходят из гнезда и начинают исследовать территорию на предмет обнаружения источников сигнала "чужой". Это – имитация защитной реакции. Или, как вариант, – сигнал "вокруг много пищи".

**Стайное поведение.** Активизируется программа движения за лидером. Задача пассивных фуражиров – следовать за лидером, активным фуражиром. Стайное движение заканчивается тогда, когда в поле зрения агентов попадает искомый объект ("пища" или

"противник"). Эта задача также относится к условно-рефлекторному уровню и реализуется мета-автоматом.

Теоретическая основа – модель образования стаи на основе процедуры прямого определения лидера (выделения доминанта), см. раздел 3.3 "Определение лидера в группе". Фактически, это – элемент задачи стайной охоты. При этом:

- запуск процедуры стайной охоты определялся сигналом, генерируемым активным фуражиром (поле  $B$  – код процедуры);
- уровень активности (силы, успешности) определялся значением поля  $E$  генерируемых сигналов состояния (эмоциональный уровень). У активного фуражира он был обычно максимальным.

На Рис. 5.23 показаны стадии стайного движения. Группа сохраняет строй до тех пор, пока агенты не обнаружат целевой объект.

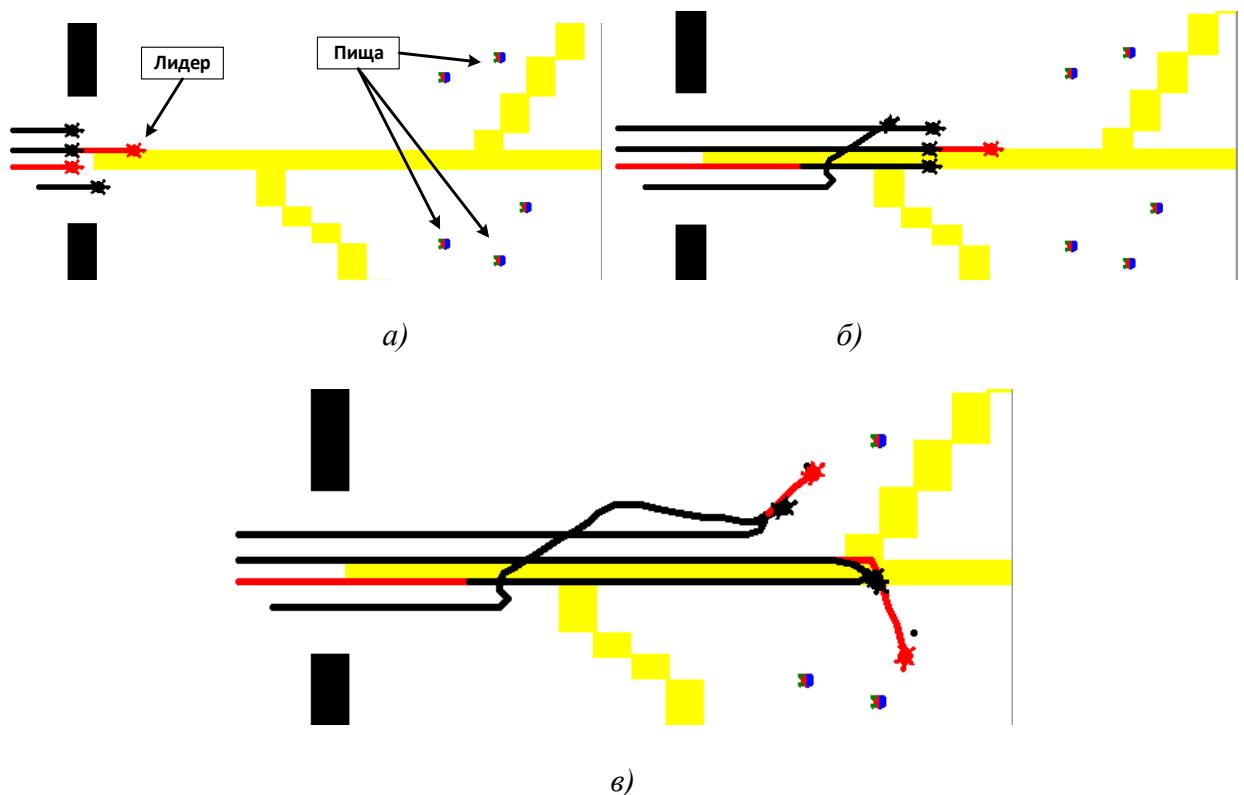


Рис. 5.23. Стайное движение. Модель в системе *Kvorum*: а) начальная стадия, б) стадия движения, в) строй нарушается – агенты обнаруживаю пищу

В качестве основного инструмента использовалась система моделирования *KVORUM* в силу того, что моделирование поведения 9 агентов в системе *Gazebo* требует слишком много времени. В *Gazebo* моделированию подлежало поведение четырех агентов, см. Рис. 5.24.

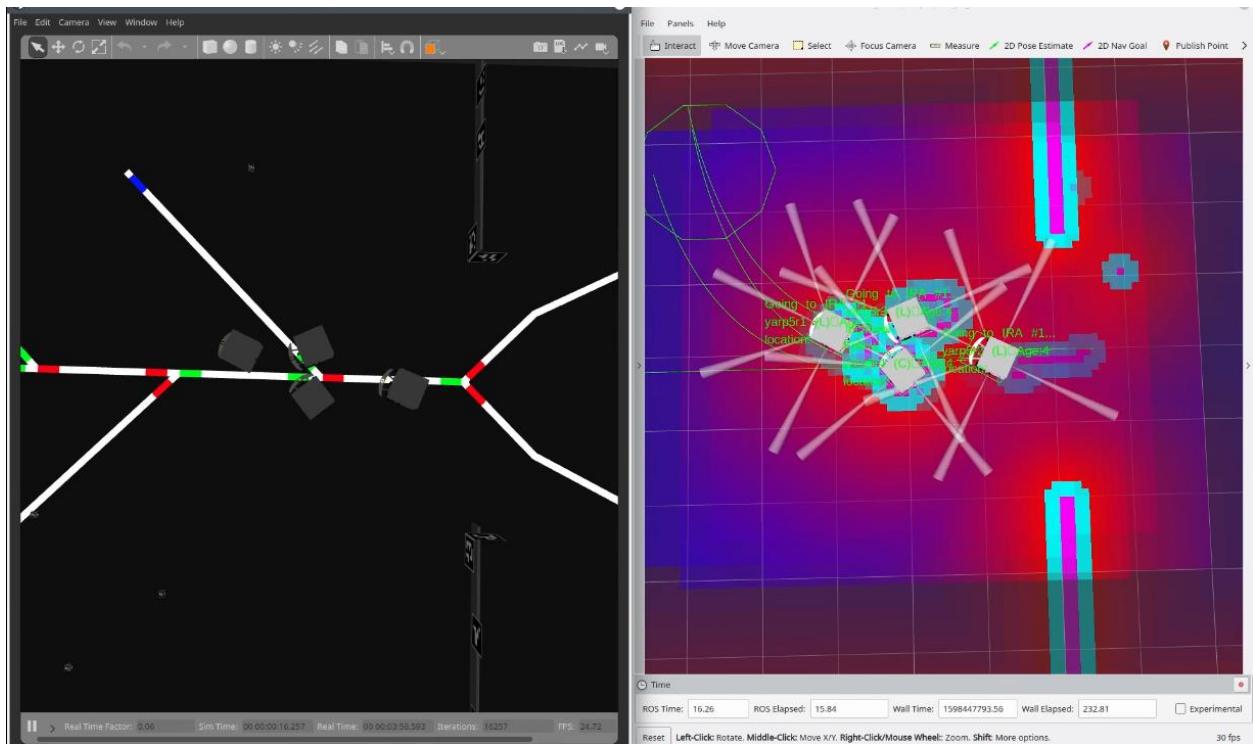


Рис. 5.24. Стойное движение. Модель в системе Gazebo (RViz)

**Примечание 1.** Варьирование уровня возбуждения (активности) разведчика позволяло естественным образом решать задачу уровня мобилизации. Если найден обильный индивидуальный поисковый участок, то высокий уровень возбуждения приводил к тому, что мобилизация затрагивала большое количество пассивных фуражиров. Бедный индивидуальный поисковый участок вызывал меньшую степень возбуждения разведчика и, как следствие, меньшее количество мобилизованных.

**Примечание 2.** Выяснилось, что процедура мобилизации с образованием стаи применима не только для фуражировки, но годится и для защитной реакции группы. Активный агент, обнаружив "чужого", возвращался в гнездо, отрабатывая ту же программу возвращения и призыва, что и при обнаружении пищи. При этом оказалось, что в такой модели естественным образом реализуются элементы агрессивного поведения, описанного в разделе 4.1 "Агрессия в задаче территориального распределения".

На Рис. 5.25 показана обобщенная диаграмма фрагмента пищевого поведения. Целью (или искомым объектом) *Goal* может быть как пища, так и "чужой".

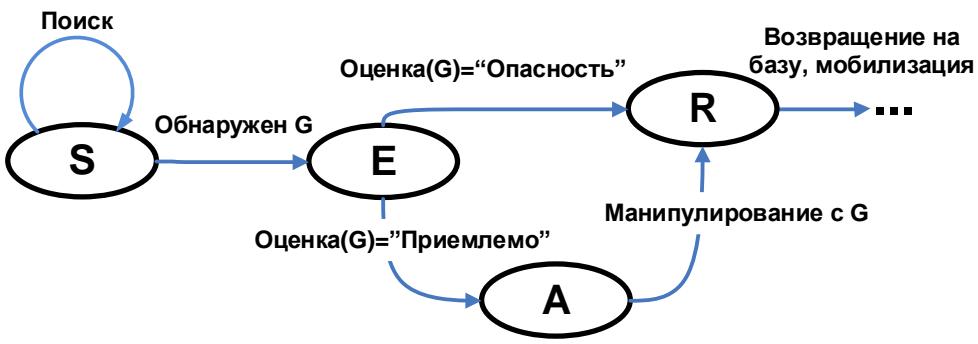


Рис. 5.25. Обобщенная диаграмма поискового поведения

В случае обнаружения *Goal* агент оценивает найденный объект. Если *Goal* – это "чужой", то оценка является комплексной: она зависит от того, сколько "чужих" и "своих" рядом, насколько агент находится далеко от базы. Если *Goal* в итоге оценивается как опасность, то агент убегает от нее – возвращается на базу, мобилизуя конспецификов. В противном случае (Оценка="приемлемо") агент "нападает" на *Goal*. На схеме это – "манипулирование с *Goal*". То же самое манипулирование происходит и в случае, если *Goal* является пищей (Оценка="приемлемо"). После чего также осуществляется возврат на базу. Интенсивность мобилизации определяется количеством пищи или, если *Goal* – "чужой", близостью от базы. Этот механизм обеспечивает решение задачи устойчивого покрытия территории, зависящего от мощности источника – количества агентов в семье. Интересно, что такой подход описывает и механизм захвата "рабов" при реализации социального паразитизма.

Представляется, что это – очень важный результат, иллюстрирующий разнообразные проявления небольшого числа базовых механизмов. Т.е. одни и те же механизмы описывают или реализуют и пищевое поведение, и защитное (территориальная агрессия), и рейдерское (захват "рабов", которые тоже рассматриваются как пищевой ресурс).

### 5.5.3. Исследование территории

Решение задач распределения роботов по индивидуальным поисковым участкам (ИПУ) и реализации механизма мобилизации подразумевало, что аниматы знакомы с местностью. В частности, использовалась инфраструктура в виде "дорог" к ИПУ или информирование о месте интереса членов группы при мобилизации. Задача группового поиска является в определенном смысле основополагающей, причем даже с точки зрения поведения общественных насекомых. Более строго, речь идет о решении задачи исследования территории с целью поиска ресурсов. Именно поиск ресурсов – пищи – является целевой функцией. С практической точки зрения наибольший интерес

представляет процесс освоения территории молодым, вновь образованным гнездом. Феноменологически, согласно В.Бургову, это выглядит так:

1. *Новая семья сначала живет за счёт ресурсов самки.*
2. *Со временем ресурсы самки истощаются, и рабочие оказываются вынужденными выходить из гнезда, чтобы добывать пищу.*
3. *По мере того, как внегнездовых рабочих становится больше, они начинают конкурировать за ИПУ.*

*При этом:*

- *новых молодых начинают вытеснять все дальние и дальне от гнезда;*
- *если семья ничем извне не ограничена (другими семьями, водой и т.д.), то рабочие идут во все стороны;*
- *далее начинает работать механизм пространственного распределения рабочих, формирование колонн и т.д.*

Траектории движения разведчиков могут быть представлены как случайные процессы. Если, для простоты, считать, что скорость постоянна, а меняется направление движения – угол  $\alpha$ , то в общем случае в момент времени  $t$  ориентация агента определяется как

$$\alpha(t) = \alpha(t-1) + \xi(t), \alpha(0) = \alpha_0 \quad (5.2)$$

Здесь  $\alpha_0$  – начальный угол ориентации агента, а  $\xi(t)$  – случайная величина.

Далее рассмотрим три варианта определения траектории движения.

**1. Случайное блуждание.** В простейшем случае это – стандартное броуновское движение. Здесь мы имеем дело с нормальным распределением, при котором

$$\xi(t) = \xi \sim N(\mu, \sigma^2), \mu=0, \sigma^2=1$$

Результаты достаточно очевидны. Если полагать, что начальное положение разведчиков фиксировано, то образуются достаточно устойчивые области исследования территории. На Рис. 5.26 изображены траектории движения агентов и "рельеф" исследуемой местности. "Глубина" следа определяется количеством проходов разведчиков по данным участкам. Чем больше проходов, тем больше "глубина".

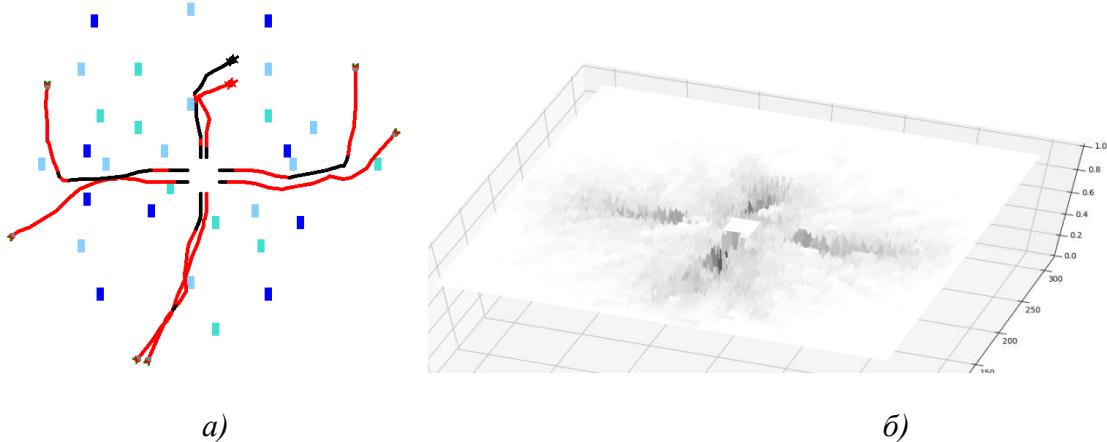


Рис. 5.26. Исследование территории. Случайный поиск: а) траектории движения, б) "рельеф" исследуемой поверхности

**2. Антикогезия.** В предыдущей модели агенты никак не учитывали наличие соседей. Это означало, в частности, что иногда траектории движения агентов были очень близки, что, естественно, не позволяет равномерно покрывать территорию. Достаточно естественным является использование "антикогезии", т.е. режима, при котором агенты стремятся не сближаться друг с другом: возникает взаимное отталкивание. В таком режиме территория исследуется более равномерно, см. Рис. 5.27.

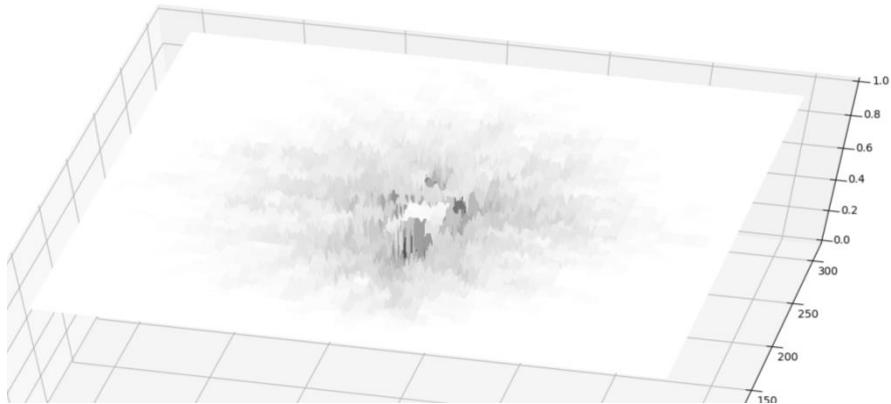


Рис. 5.27. Исследование территории. Поиск с "антикогезией"

Формально описание такого режима выглядит так. По-прежнему движение определяется выражением (5.2), однако в описании случайной величины  $\xi$  матожидание  $\mu$  становится варьируемым параметром, зависящим от расположения  $P$  других членов группы в момент времени  $t$ :

$$\mu(t) = \mu(P(t)) \quad (5.3)$$

Этот механизм взаимного избегания реализуется на поведенческом уровне правилами вида "*Если слева (справа) наблюдается конспецифик, то повернуть направо (налево)*".

**Примечание.** Антикогезия (или реакция избегания) не является каким-то особым дополнительным механизмом поведения. Мы по-прежнему остаемся в рамках базовых моделей. Уже упоминалось о таких правилах, как "*Если угроза, то нападать*" и "*Если опасность, то убегать*". В контексте пищевого поведения наличие "своего" рассматривается как помеха или угроза/опасность. В этом случае реакция анимата может быть как пассивной, так и активной, вплоть до агрессивного поведения. Еще раз: в рамках поиска "свой" воспринимается как опасность, а при нахождении на кормовом участке – как угроза.

Очевидно, что стратегия случайного блуждания, даже с антикогезией, не приводит к формированию дорог – постоянных маршрутов к индивидуальным поисковым участкам.

**3. Формирование дорог.** Итак, задача заключается в том, чтобы агенты смогли а) сформировать постоянные маршруты – дороги к ИПУ и б) дороги покрывали бы исследуемую территорию равномерно. Равномерное покрытие реализуется достаточно просто – с помощью механизма антикогезии. Формирование же постоянных дорог связано с реализацией механизма памяти. На качественном уровне это описывается так: изначально особи начинают исследовать прилегающую территорию, постепенно запоминая ориентиры. Далее они начинают двигаться предпочтительно по знакомым местам, отходя от гнезда все дальше. При нахождении пищи анимат возвращается в гнездо.

Пусть маршрут движения  $Route$  представим как последовательность (упорядоченное множество) пар  $(Sc_i, Act_i)$ , где  $Sc_i$  – описание наблюдаемого ориентира (объекта или группы объектов),  $Act_i$  – действие, совершаемое по отношению к  $Sc_i$  (обход  $Sc_i$  слева, справа или движение к  $Sc_i$ ):

$$Route = \{(Sc_0, Act_0), (Sc_1, Act_1), \dots, (Sc_g, Act_g)\}$$

Общий алгоритм поискового поведения выглядит так:

#### **Алгоритм ScOM. Поисковая процедура с запоминанием маршрута**

Дано: сохраненный в памяти маршрут  $Route$  (изначально  $Route$  пуст)

1. Определить направление движения, соответствующее началу маршрута  $(Sc_0, Act_0)$
2. **while** не достигнуто целевое состояние  $Sc_g$  **do** Отрабатывать маршрут **endwhile**
3. **if** найдена пища **then** Возвращение в гнездо
4. **else**:
5.     Включить процедуру случайного поиска (например, с антикогезией)  $PRS$
6.     **while** не найдена пища **do**
7.         Определить наблюдаемые ориентиры  $Sc_i$
8.         Сделать очередной шаг  $Act_i$  процедуры  $PRS$

```

9.      Запомнить:  $Route \leftarrow Route \cup (Sc_i, Act_i)$ 
10.     endwhile
11.     Возврат в гнездо
12. endif

```

В начале освоения территории маршрут  $Route$  пуст, поэтому сначала выполняется процедура случайного блуждания. Алгоритм  $ScOM$  повторяется циклически, обеспечивая постепенное освоение территории.

Вопросы возвращения в гнездо в работе не рассматривались в силу того, что в природе обратный путь муравьи проходят по-разному. Либо рассматривая купол гнезда как глобальный ориентир, либо используя иные механизмы. Но возвращаются они обычно кратчайшим путем. Строго говоря, здесь, возможно, задачу надо решать гораздо более простую: задать случайный поиск до тех пор, пока не будет найдена пища, а запоминать лишь обратную дорогу от найденной пищи до гнезда. При этом, поскольку муравьи обладают чувством направления ("компасом"), запомнить надо лишь это направление. Правда, такая схема обладает двумя сомнительными моментами: а) она слишком примитивна и здесь нет предмета исследования и б) она не объясняет, почему дороги к ИПУ образуют сложные разветвленные структуры.

В любом случае, в Приложении 1 описан один из механизмов запоминания маршрута движения – модель пространственной памяти анимата. В основе модели – формирование ассоциативных связей между множеством наблюдаемых ориентиров и совершаемых аниматом действий. Этот механизм является основой алгоритма  $ScOM$ .

Алгоритм поиска  $ScD$ , основанный на запоминании направления движения, приведен ниже:

#### Алгоритм $ScD$ . Поисковая процедура с запоминанием направления

```

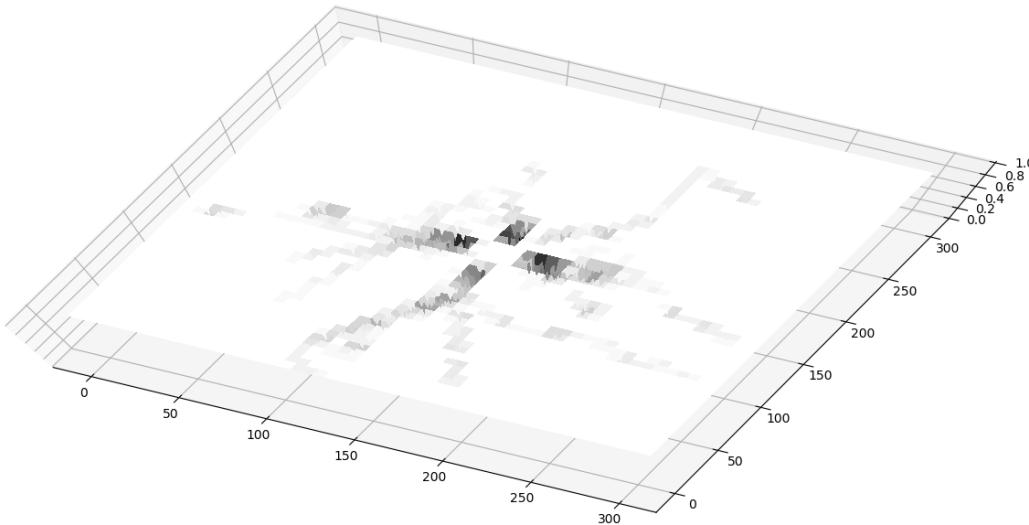
Дано: сохраненное в памяти направление к ИПУ D
(изначально D не определено:  $D \leftarrow nil$ )
1. if  $D == nil$  then
2.       Включить процедуру случайного поиска PRS
3.       while не найдена пища do
4.           Сделать очередной шаг  $A_i$  процедуры PRS
5.       endwhile
13. else
14.       while не найдена пища do
15.           Двигаться в направлении D
16.       endwhile
17. endif
18. Определить направление на гнездо D1

```

19. Возврат в гнездо

20. Определить D

На Рис. 5.28 представлен рельеф территории для случая работы алгоритма *ScD*. Здесь видны явно выраженные дороги – локализованные маршруты к ИПУ.



*Рис. 5.28. Разведка территории. Алгоритм ScD*

Сама по себе задача исследования территории не носит явного группового и тем более – социального характера. В рассмотренных моделях единственным аспектом группового взаимодействия была антикогезия. Несмотря на свою кажущуюся сугубую "техничность", эти модели остаются в рамках единой парадигмы организации поведения аниматов, используя из базового набора механизмов эмоционально-потребностную архитектуру (потребность заставляет начать поисковую процедуру) и реакцию на угрозу/опасность (антикогезия).

## 5.6. Прочие задачи

**Коллаборативные системы.** Одной из решаемых в исследовании задач было создание системы управления коллаборативной тренировочной роботизированной наземной мобильной платформой, которая решает задачи мониторинга и разведки в условиях угрозы или возникновения чрезвычайных ситуаций (заказчик – аварийно-спасательное формирование ООО «ЯРСПАС»). При создании робототехнических систем, взаимодействующих с человеком-оператором при выполнении совместных операций в сложных недетерминированных (естественных) средах, особое внимание уделяется "естественноти" поведения робота-партнера, адекватности его реакций ожиданиям оператора.

На Рис. 5.29 изображен исследовательский прототип робота-партнера, на котором отрабатывались модели автономного поведения, механизмы сигнальной коммуникации и модель сопоставления наблюдаемого объекта (человека) в категориях "свой-чужой-нейтральный", описанные в диссертации выше.



*Рис. 5.29. Экспериментальная платформа Ritrover*

Основной тестовой задачей было создание робота-партнера для совместного патрулирования территории. В основе архитектуры СУ робота лежала эмоционально-потребностная модель, а основным способом взаимодействия с пользователем была сигнальная коммуникация. Сигнальная коммуникация определяла выполнение роботом 5 команд типа "ко мне!", "фас!", "ищи!", "фу!", "гулять!", реализующих соответствующие поведенческие процедуры (движение к оператору; поиск объекта класса "нарушитель" и имитация атаки; поиск объекта интереса; отмена команды; свободный поиск). Характерно, что подобные механизмы и архитектура оказались применимыми в почти неизменном виде и для создания СУ тренировочной платформы. В перечень компонентов этой платформы был добавлен алгоритм совместного группового движения. Семантика поведенческих процедур осталась неизменной.

Полная эмоционально-потребностная схема приведена на Рис. 5.30.

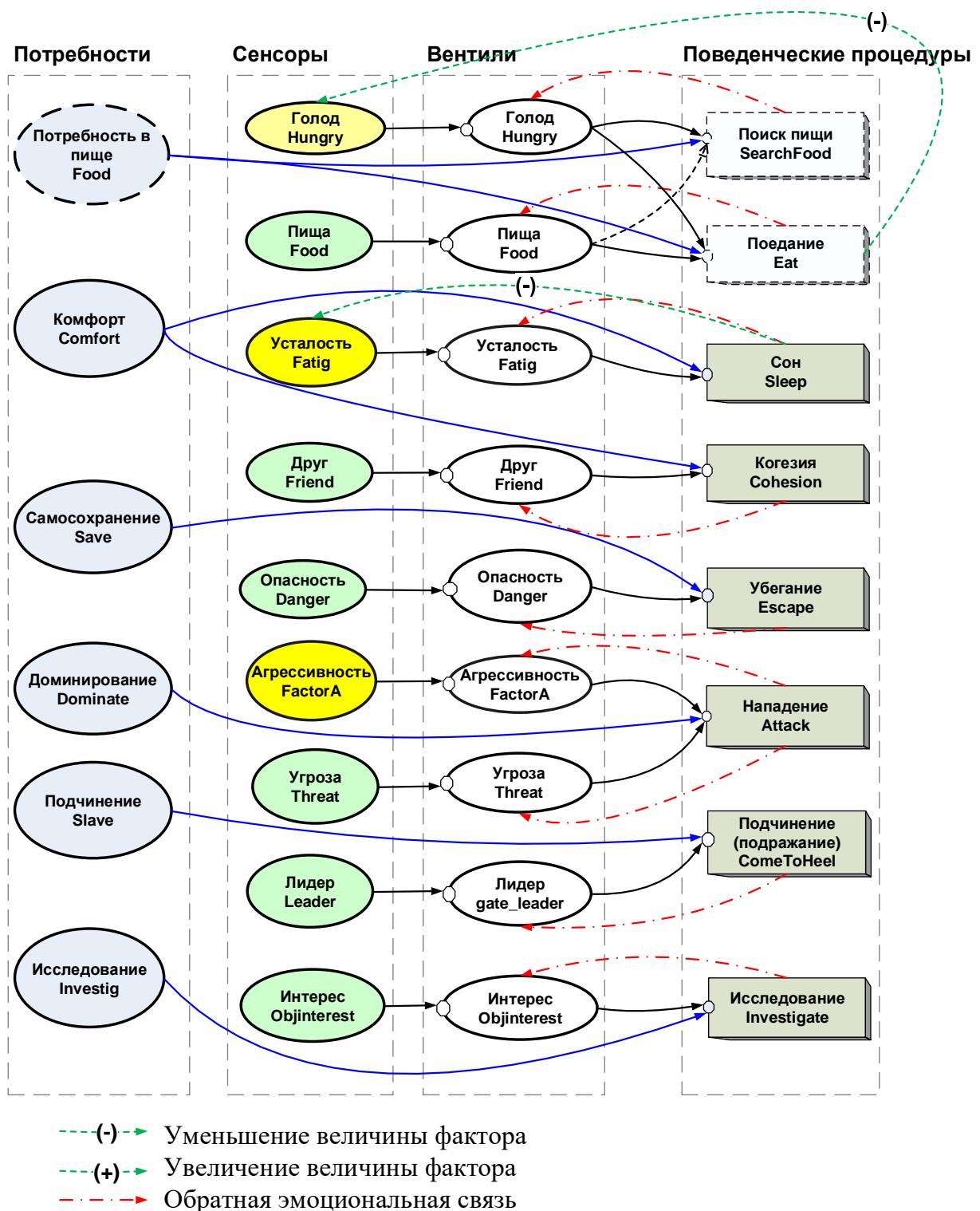


Рис. 5.30. Эмоционально потребностная схема колаборативного робота

В ней имеются избыточные для решаемой задачи элементы типа процедур "Поиск пищи" и "Поедание", однако они были формально оставлены для общности моделирования поведения агента, а их деактивация была осуществлена просто обнулением потребности "Потребность в пище". Наиболее важным моментом была реализация сенсорики агента, прежде всего – вторичных, т.е не связанных с показанием

физических рецепторов, сенсоров "Друг", "Лидер", "Угроза", "Опасность" и "Интерес". Значение этих сенсоров задается распознаванием конспецифика и определением его степени близости и "силы".

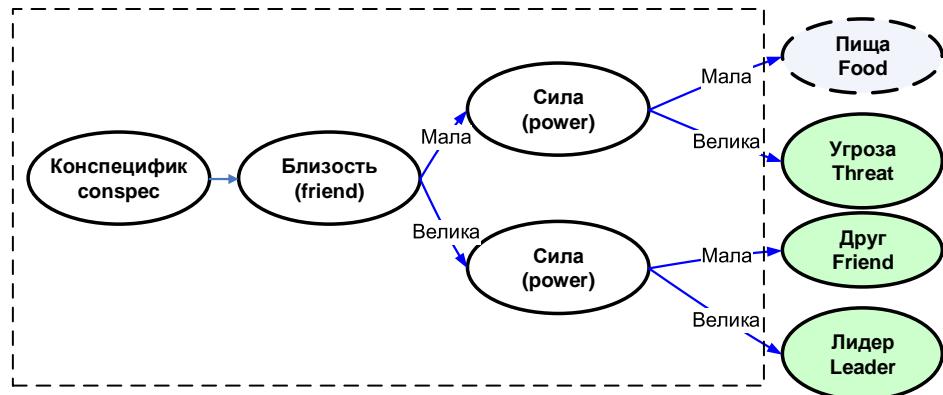


Рис. 5.31. Вторичные сенсоры

"Опасность" определяется как наличием сильного "чужого", так и внешними опасными факторами (громкий звук, огонь, вода...).

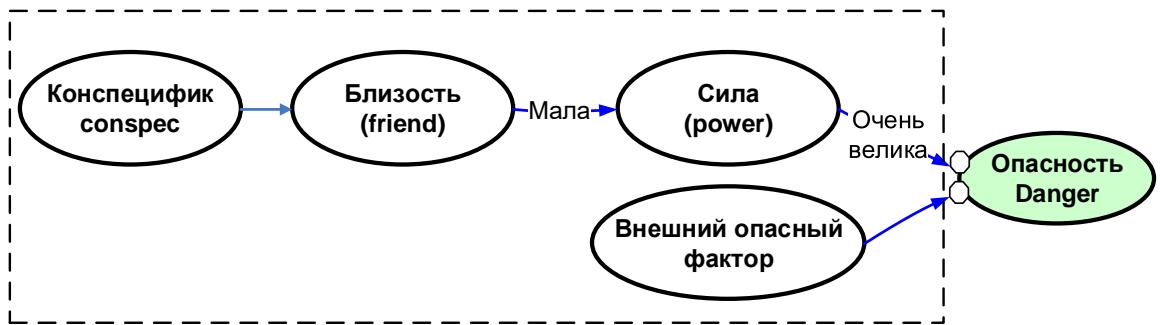


Рис. 5.32. Сенсор "Опасность"

Сенсор "Интерес" определяет появление "объекта интереса". Варианты объектов интереса: человек, не опознанный с точки зрения "свой-чужой"; лежащий человек (пострадавший); артефакт с меткой. Вне зависимости от типа объекта интереса, робот приближается к нему (процедура "Исследование").

Фактически, тренировочная платформа осуществляла автономное поведение, в которое оператор мог вмешиваться исключительно и только средствами сигнальной коммуникации, запуская те или иные поведенческие процедуры.

**Система мониторинга прибрежной акватории.** Задача заключалась в создании компонентов системы управления группировкой малых автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА), осуществляющих мониторинг водной обстановки при разливах нефти (Заказчик – ООО «Аварийно-спасательная служба Нефтегазового и Топливно-Энергетического Комплекса»). АНПА должны быть дешевы в силу

необходимости их большого количества. Специфика условий функционирования АНПА – это ограниченность их сенсорных возможностей и локальный характер взаимодействия в группе. Кроме того, необходимо было обеспечить возможность объединения локальных баз данных после завершения мониторинга. Таким образом, основными механизмами, реализованными в проекте, были:

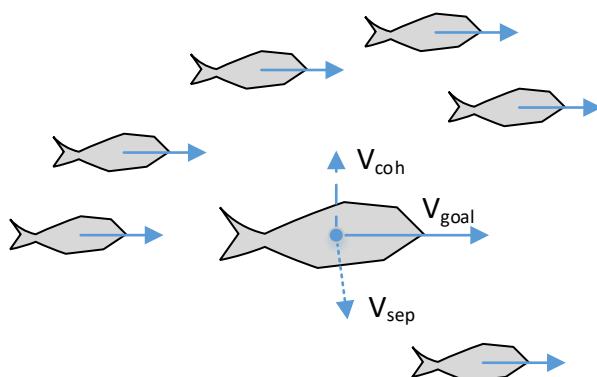
1. Алгоритм совместного движения группы АНПА с динамическим лидером.
2. Модели и методы сигнальной коммуникации в группах АНПА.
3. Алгоритм формирования лидера в статическом рое с целью обеспечения синхронизации при обмене данными.

Разумеется, для этой задачи не нужны принципы сложной социальной организации. Особенно это касается двигательного поведения, которое было реализовано на основе мета-автоматных принципов управления, а реально работающими "социальными" феноменами были механизм определения динамического лидера и когезии.

В основе алгоритмов лежал гибридный подход: движение АНПА задавалось непрерывными законами управления – правилами стайного движения Рейнольдса [Reynolds, 1987], а поведение, как переключение между двигательными программами, определялось на дискретно-событийном уровне, с помощью мета-автоматов. Основными правилами движения были:

1. Отталкивание (Separation). Избегание скопления соседей, ближнее отталкивание (Avoid crowding neighbours, short range repulsion).
2. Выравнивание курса (Alignment). Придерживаться среднего курса соседей (Steer towards average heading of neighbours).
3. Когезия (Cohesion). Ориентация на среднее положение соседей, притяжение с больших расстояний (Steer towards average position of neighbours, long range attraction).

Эти действующие на агента "силы" условно изображены на Рис. 5.33.



*Рис. 5.33. "Силы", действующие на агента:  $V_{coh}$  – когезия,  $V_{sep}$  – отталкивание,  $V_{goal}$  – целевое направление движения*

Все программы движения, определяющие действия того или иного правила, формируют вектор функции управления  $F$ :

$$\text{Prog}(\text{agent}) \rightarrow F = (V_{ctl}, [\alpha_{yaw}, \alpha_{pitch}, \alpha_{roll}]),$$

где  $V_{ctl}$  – линейная скорость движения,  $\alpha_{yaw}$ ,  $\alpha_{pitch}$ ,  $\alpha_{roll}$  – углы рыскания, тангла и крена соответственно. Добавление правил движения по заданному пеленгу  $FBearing$ , непосредственно заданной скорости  $FSetSpeed$ , а также движения к объекту интереса приводит к следующему комплексному алгоритму:

```
function FFlockMovement (A)
    (s_coh, a_coh) := FCohesion2 (A)
    (s_sep, a_sep) := FSeparation2 (A)
    (s_align, a_align) := FAlignment (A)
    (s_bear, a_bear) := FBearing (A)
    (s_setsp, a_setsp) := FSetSpeed (A)
    (s_interest, a_interest) = FConvergence (A)
    -- Сумма векторов
    (s, a) := (A.k_coh*s_coh, a_coh) + (A.k_sep*s_sep, a_sep) +
        (A.k_align*s_align, a_align) + (A.k_bear*s_bear, a_bear) +
        (A.k_setsp*s_setsp, a_setsp) + (A.k_interest*s_interest, a_interest)
    -- Ограничение скорости
    s = min (s, max_speed)
    return (s, a)
```

Прямое управление движением и определение коэффициентов значимости правил движения, исходя из текущей ситуации, определялось на автоматном уровне. На Рис. 5.34 приведены примеры таких автоматов.

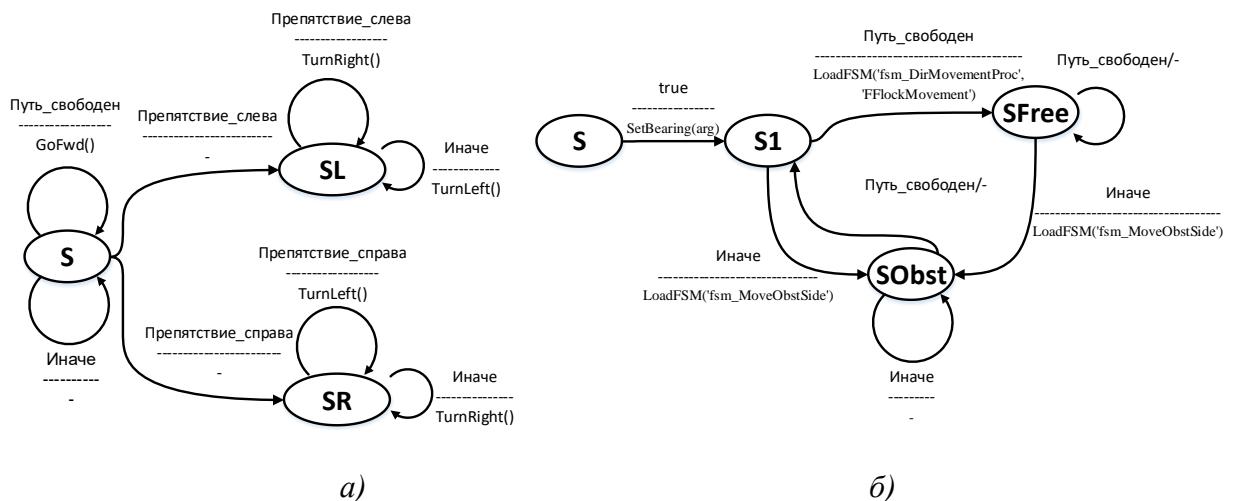


Рис. 5.34. а) автомат "Движение вдоль препятствия боком", б) мета-автомат процедуры "Движение по пеленгу"

Основной технической проблемой при реализации проекта была локализация АНПА в пространстве, которая обеспечивалась системой гидроакустических маяков. Создание собственно АНПА и подводной инфраструктуры – это задачи заказчика, аварийно-спасательной службы. Локальное взаимодействие между АНПА осуществлялось на уровне сигнальной коммуникации на основе системы ИК-маяков, чего было достаточно для расстояния между аппаратами до двух метров. Для этого АНПА оснащались множеством ИК-маяков излучателей, работающих с большой мощностью в импульсном режиме, а также ИК-приемниками на основе элементов *TSOP*, см. Рис. 5.37.

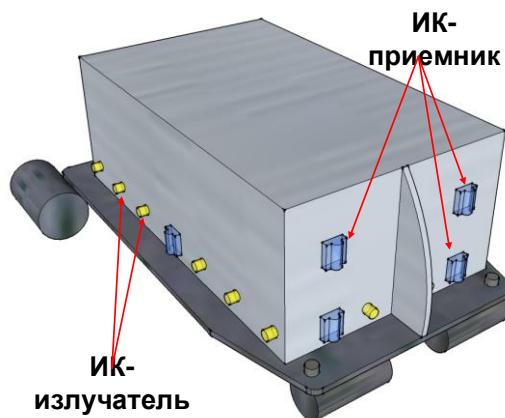


Рис. 5.35. Условное изображение АНПА

Одним из основных требований к группировке АНПА была их максимальная дешевизна, поэтому в качестве бортового вычислителя использовалась *Raspberry Pi 4*. Само программное обеспечение было создано на основе языка *Python*.

На Рис. 5.36 представлена лабораторная группировка АНПА, на которой отрабатывались механизмы локальной связи и совместного движения.

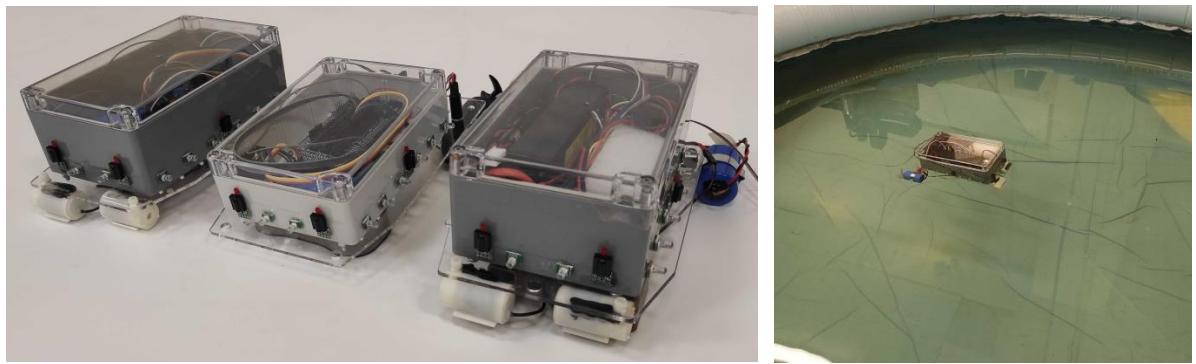


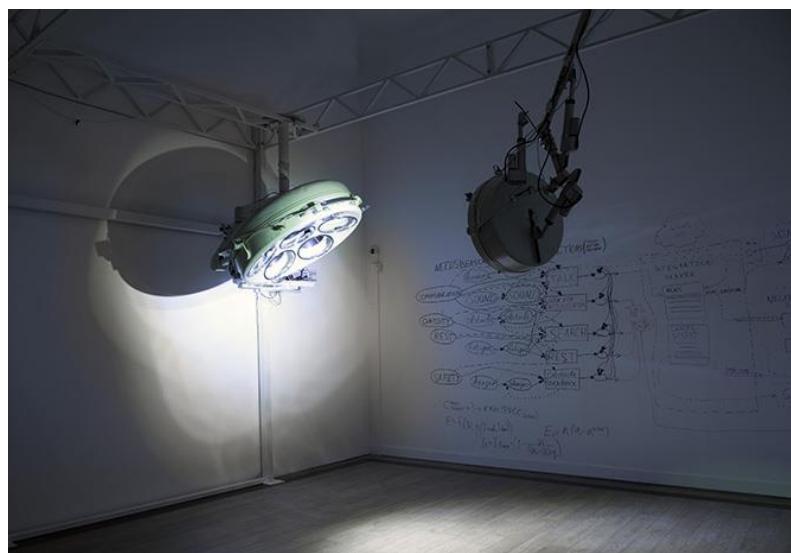
Рис. 5.36. а) лабораторный прототип группы АНПА, б) АНПА в лабораторном бассейне

**Индивидуальное поведение.** К иным практическим результатам можно отнести и созданную систему управления аниматронным комплексом для некоторого изделия из области *ScienceArt*. На международной художественно-научной конференции "DAEMONS

IN THE MACHINE. Предвосхищая искусственный интеллект", которая проходила в Москве 17 марта 2018 г., демонстрировался комплекс, важной частью которого была пара управляемых медицинских светильников [Нож, 2018]. В том же году этот комплекс демонстрировался в Московском музее современного искусства в рамках выставки "Daemons in the Machine" 05.10.2018 – 11.11.2018, а в марте 2019 г. изделие было представлено на выставке Cybernetic Consciousness в г. Сан-Паулу (Бразилия). Художник – Томас Фойерштайн (Thomas Feuerstein), Австрия.



*Рис. 5.37. Изображение комплекса. Фотография из публикации [Нож, 2018]*



*Рис. 5.38. Изображение комплекса. Сайт художника Т.Фойерштайна  
[https://www.thomasfeuerstein.net/50\\_WORKS/30\\_DAIMON/82\\_BORGY\\_BES](https://www.thomasfeuerstein.net/50_WORKS/30_DAIMON/82_BORGY_BES)*

Аниматронный комплекс представлял собой медицинские лампы, оснащенные актуаторами и рядом датчиков – как физическими (освещенность, звук, препятствия), так и виртуальными (имитация речевых сообщений). Поведение светильников (движение, ФКД) определялось поступающими от датчиков сигналами, а также параметрами "диалога", который эти светильники вели между собой. В основе системы управления лежала эмоционально-потребностная схема, Рис. 5.39.

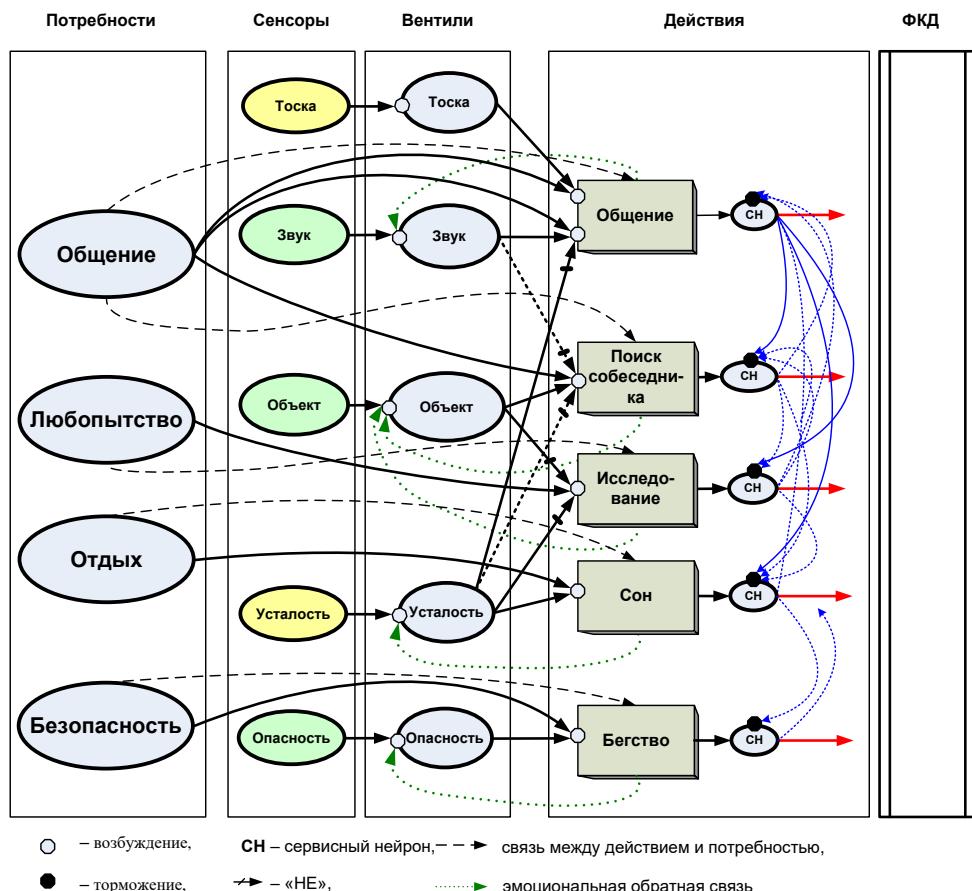


Рис. 5.39. Схема поведения объекта "Светильник"

Важно отметить, что именно реализация эмоционально-потребностной системы управления позволила естественным образом решить задачу формирования адекватного поведения комплекса в условиях ограниченного количества выражительных средств, т.е. скромных эффекторных возможностей.

## 5.7. Выводы к главе 5

В этой главе были рассмотрены вопросы практического применения разработанных моделей и методов социального взаимодействия между роботами. Важнейшим аспектом исследований является апробация теоретических результатов на реальных технических объектах. Разумеется, создание множества мобильных роботов – это сугубо техническая

задача. Однако здесь следует отметить, что созданная архитектура системы управления мобильными минироботами оказалась крайне удачной, позволившей реализовать весьма представительную группировку из примерно 20 устройств. Это дало возможность провести серию масштабных натурных экспериментов. Архитектура оказалась достаточно открытой и универсальной для того, чтобы на ее основе создавались роботы совершенно разных классов.

Имеющиеся количественные оценки необходимой численности особей для решения тех или иных задач, размеры и насыщенность полигона, а также сам оборудованный полигон – все это позволило провести действительно адекватные изучаемым процессам и явлениям эксперименты.

Важнейшую роль в процессе изучения моделей социального поведения играет наличие инструментальных средств для проведения вычислительных экспериментов. Для этого была создана специализированная система моделирования *KVORUM*, одной из важных черт которой была возможность реализации изучаемых моделей на реальной группировке роботов. Это обеспечивалось "прозрачностью" интерфейса системы моделирования, т.е. возможностью переадресации потоков команд и сенсорных данных от виртуальных агентов к реальным – роботам архитектуры *YARP*.

В качестве содержательных задач, демонстрирующих работоспособность разработанных моделей, были выбраны классические задачи групповой робототехники – задачи пищевого поведения и патрулирования. Наиболее показательной оказалась задача пищевого поведения, точнее, такая ее составная часть, как процедура распределения агентов по кормовым участкам. Оказалось, что в основе решения этой достаточно нетривиальной задачи лежат два базовых механизма – память и агрессивное поведение. Собственно, наиболее значимым явился анализ вопроса агрессии. Важный вывод заключался в том, что с практической точки зрения говорить о существовании неких специфических механизмах агрессивного поведения является неконструктивным. Есть лишь внешняя, причем явно ситуативная оценка тех или иных элементов и/или результатов поведения, которые можно расценивать как проявление агрессии.

Задача патрулирования была рассмотрена лишь частично, в плане реализации одного ее элемента – задачи планирования движения. Причины непоказательности этой и подобной задач были раскрыты в разделе "Территориальный гомеостаз". Прочие приведенные примеры касаются сугубо технического аспекта – вопросов применения некоторых архитектурных решений для ряда задач, не связанных с основной областью исследования, но касающихся вопросов поведения – как роботов, так и иных технических систем.

Итак, к основным итогам практической части можно отнести следующее:

1. Создание представительной группировки мобильных роботов с единой архитектурой (роботы серии *YARP*).
2. Разработка специализированной системы имитационного моделирования *KVORUM*.
3. Исследование вопросов агрессивного поведения и реализация модели распределения агентов по пищевым участкам.
4. Реализация процедуры планирования движения в задаче патрулирования.
5. Реализация проекта "Кибермуравейник" для отработки программно-аппаратных решений в области МСП.
6. Применение разработанных программно-аппаратных и поведенческих архитектур для решения таких технических задач, как создание мобильной платформы для проведения подспутниковых измерений, создание коллаборативных систем, групповой мониторинг прибрежных акваторий и создание аниматронного комплекса.

## 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, свободным от весьма искусственных аналогий и даже спекуляций. Кроме того, здесь важно подчеркнуть еще раз, что социальная организация группы агентов – это прежде всего один из возможных способов решения задачи выживания (для живых организмов) или обеспечения устойчивого функционирования (для искусственных агентов и технических систем).

Третье предположение – это возможность создания некоторого конструктора, множества механизмов и методов, комбинируя 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 технологии 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 о том, что представляет собой слон.

Более того, существуют определенные сложности в определении адекватности предложенных в работе моделей. Приведем цитату из работы Лоренца [Лоренц, 1994]. Она весьма откровенна.

*"Индуктивное естествознание всегда начинается с непредвзятого наблюдения отдельных фактов; и уже от них переходит к абстрагированию общих закономерностей, которым все эти факты подчиняются. В большинстве учебников, ради краткости и большей доступности, идут по обратному пути и предполагают "специальной части" – "общую". При этом изложение выигрывает в смысле обозримости предмета, но проигрывает в убедительности. Легко и просто сначала сочинить некую теорию, а затем "подкрепить" ее фактами; ибо природа настолько многообразна, что если хорошенъко поискать – можно найти убедительные с виду примеры, подкрепляющие даже самую бессмысленную гипотезу." (В оригинале это звучит так: "Inductive natural science always starts without preconceptions from the observation of individual cases and proceeds from this towards the abstract law which they all obey. Most textbooks take the opposite course for the sake of brevity and clarity and set down the general before the particular. The presentation is thereby made more lucid but less convincing. It is only too easy first to evolve a theory and then to under-pin it with examples, for nature is so diverse that with diligent searching one can find apparently convincing examples to support wholly abstruse hypotheses." [Lorenz, 2002]).*

Тем не менее, можно утверждать, что основным результатом исследований является создание и становление нового направления исследований в групповой

робототехнике – применение моделей и механизмов социального поведения для построения социумов искусственных агентов – роботов.

Проведенные исследования затрагивали такие области, как средства моделирования, модели поведения, архитектура агентов, методы планирования, сенсорика, коммуникация, создание аппаратной базы для проведения экспериментов. Исследования велись по следующим магистральным направлениям: (1) биологически инспирированные модели и методы социального поведения – базовый уровень; (2) вопросы технической и программной реализации моделей и методов – программно-аппаратный уровень; (3) общие вопросы организации взаимодействия в социуме интеллектуальных агентов (роботов) – системный уровень.

Была проведена формализация задачи организации социальных сообществ искусственных агентов – роботов. Был сформулирован перечень базовых моделей поведения агентов (контагиозное, подражательное, агрессивное и пр.), механизмов и методов (дифференциация в группе, выбор лидера, общение и т.д.), а также макрофеноменов поведения (образование коалиций, пространственная ориентация, популяционная регуляция и проч.). Итогом стало создание концептуальной схемы, определяющей перечень и связи базовых механизмов и методов, позволяющих образовывать различные виды социальных сообществ [Карпов, 2016а].

В целом эти исследования относятся к категории биологически инспирированных архитектур [Карпов, 2016с]. Были созданы обобщенные семиотические архитектуры автономных агентов (роботов), способных к образованию социальных сообществ. Используемая модель агента позволяет описывать процессы языкового межагентного общения и отражает такие психические феномены поведения, как эмоции и темперамент. Разработанные модели и архитектуры оказались пригодными для решения конкретных, прикладных задач группового и индивидуального управления (исследование территории, групповое картографирование и т.д. [Karpov и др., 2016]). Разработанные модели позволили также описать такие «экзотические» феномены поведения и явления, как паразитическое зомбирование (манипулирование) и расщепление сознания [Карпов, 2016с], [Karpov, 2017], [Karpov, 2016]. Основные результаты были представлены в монографии [Карпов, Карпова, Кулинич, 2019].

Здесь важно, что в ходе исследований показаны а) работоспособность предложенных моделей и б) универсализм предлагаемых решений.

**Об эффективности МСП.** Очевидно, что любая из рассмотренных в работе задач может быть решена своим особенным, специальным способом (алгоритмом, методом), причем решена оптимально. Суть же предлагаемого подхода заключается в том, что

вместо создания множества решений для каждой из возможных задач, предлагается некий претендующий на общность универсальный (базовый) набор методов, ровно так, как происходит это в живой природе. Платой за универсализм (простоту, естественность) всегда является неоптимальность. Критерием успеха экспериментов является именно продемонстрированная возможность решения комплексной задачи – территориального гомеостаза. Основной же синергетический эффект проявляется в способах решения этой задачи: формирование функциональной неоднородности в группе агентов, распределение задач, совместная деятельность и т.д., причем все эти механизмы реализуются в группе агентов с ограниченными когнитивными способностями и на основе локальной сигнальной коммуникации, опираясь исключительно и только на набор базовых механизмов социального взаимодействия.

Перечислим те основные задачи, которые удалось решить на данный момент:

**1. Методологический базис.** Исходя из рабочей схемы 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:**

- a) введена модель группы роботов в виде статического роя;
- b) определены механизмы решения задач хранения и поиска информации, управления, согласованного движения в статическом рое на основе механизма локального взаимодействия;
- c) предложены механизмы определения лидера и распределения задач в группе (дифференциация функций).

**4. Реализация ряда механизмов и феноменов социального поведения**, таких как механизмы когезии, доминирования, распределения и т.п., а также образование коалиций в коллективе роботов. Разработаны модели социального обучения и подражательного поведения.

**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.

**7. Управление характером поведения социума.** Предложены методы, позволяющие манипулировать характером поведением социума в интересах решения прикладных задач.

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

### **Перспективные задачи**

Итогом исследований стало создание нижнего (базового, "физиологического") и среднего (поведенческого) уровня системы управления индивида – члена социума роботов. Это основа для создания верхнего уровня управления – надстройки над базовой архитектурой в виде некоторой знаковой сети. Именно на уровне знаковой – семиотической – модели возможна реализация таких важнейших феноменов, как самосознание, рефлексия, социальное обучение, эмпатия, мотивация и целеполагание. Все это является основой для решения задач иного класса – задач управления поведением социумом искусственных агентов.

Кроме того, важным перспективным направлением исследований является изучение гетерогенных коллективов роботов и влияния морфологических различий на функционирование социума. Особое внимание должно быть уделено влиянию морфологических различий агентов на внутрисоциальные отношения в коллективе, а также тому, как взаимодействуют между собой различные группы роботов (агентов), образующие социумы. В конечном итоге это сводится к вопросам управления социумом. Здесь важно подчеркнуть, что социум рассматривается как некое устойчивое, замкнутое образование, деятельность которого поддерживается целым комплексом законов и правил внутригруппового взаимодействия.

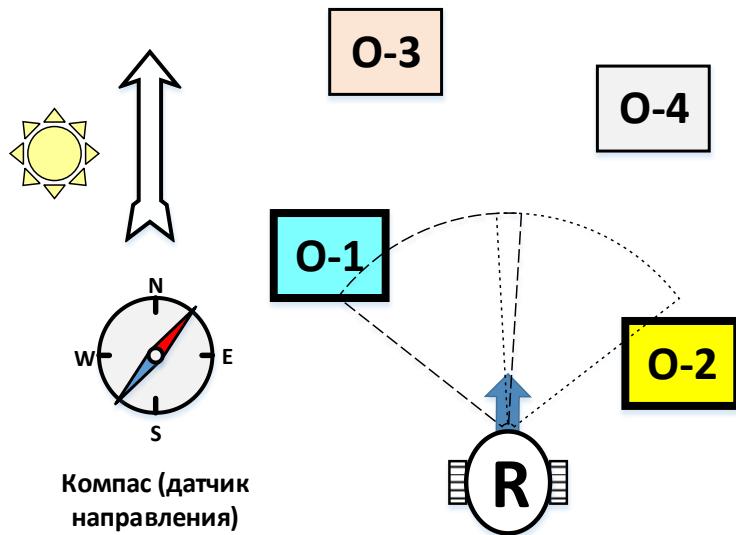
## ПРИЛОЖЕНИЕ 1. МОДЕЛЬ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ПАМЯТИ АНИМАТА

Задача запоминания и описания маршрута движения с его последующей отработкой является одной из базовых в мобильной робототехнике. Решается она с помощью самых разнообразных подходов. В простейшем случае – это отработка множества маршрутных точек с использованием средств глобальной и локальной навигации, вплоть до одометрии. Весьма активно применяются методы семейства т.н. *SLAM* (*Simultaneous localization and mapping* – одновременная локализация и построение карты). Сравнительные характеристики некоторых методов *SLAM* см., например, в [Kümmerle и др., 2009] и [Kuzmin, 2018], а достаточно показательный общий обзор представлен в [Cadena и др., 2016]. Есть также работы, в которых запоминание и отработка маршрута осуществляется на основе обучения нейронных сетей. Так, в работе [Евсеев, 2017] рассматривается алгоритм навигации мобильного робота на основе рекуррентных нейронных сетей. Альтернативным подходом является абстрактное представление маршрута, оперирующего множеством ориентиров. В этом случае маршрут представляет собой множество описаний сцен, которые должен распознать робот. При этом отработка двигательных функций в той или иной сцене определяется механизмами нижнего уровня – например, конечными автоматами, типичными задачами которых является обход объектов-ориентиров справа/слева/между и пр., [Карпова, 2017б]. Этот подход характерен для задач мобильной робототехники, в которых важна, прежде всего, поведенческая составляющая.

В отличие от представленных выше подходов нас интересует схема организации памяти универсального характера, позволяющая решать не только навигационные задачи, но и хранить информацию произвольной семантики.

### **Постановка задачи**

Рассмотрим следующую задачу. Пусть робот снабжен парой датчиков-локаторов, способных определить объекты, попадающие в зоны их действия – левый и правый секторы. Кроме того, робот оснащен еще одним датчиком – компасом. Условно это изображено на Рис.1. Задача заключается в том, чтобы робот, пройдя по маршруту, запомнил его и смог бы впоследствии воспроизвести.



*Рис. 1. Условная схема органов чувств робота. В зону видимости робота попали объекты O-1 и O-2*

Простоты ради будем полагать, что детекторы-локаторы определяют лишь наличие обнаруженных объектов левым и правым "глазом". Наличие "компаса" не является искусственным допущением. Так, многие насекомые могут определять направление движения, используя сенсор поляризации солнечного света, см., например, [Захаров, 2018]. Пусть робот может распознавать ограниченное число объектов  $O = \{o_i\}$ , а сенсорная система робота может быть представлена множеством элементарных детекторов, каждый из которых отвечает за регистрацию элементарного события (левый глаз видит объект  $o_1$ , правый –  $o_2$ , угол ориентации равен  $\alpha_2$  и т.п.). Компас также может быть дискретным, определяя угол направления, скажем, в румбах. При таких соглашениях будем считать, что робот оснащен множеством двоичных датчиков. Это означает, что наблюдаемая в момент времени сцена представлена множеством кадров, каждый из которых – это вектор

$$S = \{s_i\}, s_i=0,1, i=1..n \quad (1)$$

Здесь и далее мы будем использовать следующую терминологию: кадр – это текущее состояние сенсорных элементов, а сцена – это уже некоторая последовательность кадров вместе с тем, что можно назвать контекстом (далее в роли контекста будет выступать множество ассоциативных вершин и вершины-счетчики, об этом ниже).

Пусть робот движется по некоторому маршруту, пример которого представлен на Рис. 2,а. На Рис. 2,б представлен тот же маршрут с точки зрения сенсорной системы робота.

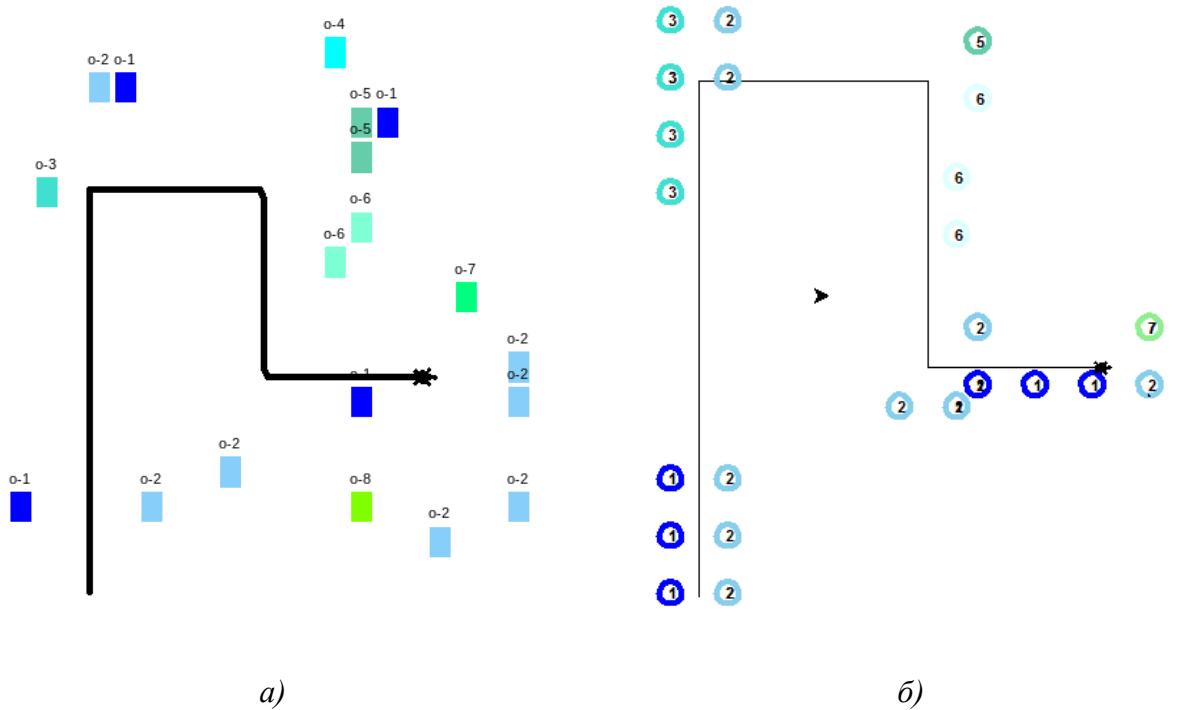


Рис. 2. а) Реальный маршрут движения робота, б) маршрут с точки зрения сенсорной системы робота

Видно, что часть объектов не попадает в зону действия сенсорной системы, а многие объекты продублированы. Это связано с тем, что во время движения наблюдаемые объекты какое-то время остаются в зоне видимости.

### Организация памяти

Рассмотрим устройство памяти робота. Во избежание ненужных ассоциаций с биологическими и искусственными нейронными сетями, будем использовать слово "элемент". Память состоит из элементов 4-х типов: сенсорные элементы  $S=\{s_i\}$ , ассоциативные  $T=\{t_i\}$ , элементы-счетчики  $C=\{c_i\}$  и эффекторные (или моторные) элементы  $A=\{a_i\}$ . Все эти элементы могут находиться в одном из двух состояний – 0 или 1.

Сенсорные элементы отвечают за регистрацию текущего наблюдения (кадра) согласно (1). Эффекторные элементы определяют производимое в данный момент времени действие (движение вперед, поворот налево/направо). Элементы  $t_i$  отвечают за процессы формирования ассоциаций (это – рабочие элементы), а элементы-счетчики отвечают за представление времени в системе. Связи между элементами формируются динамически. При этом ассоциативные элементы возбуждаются только тогда, когда возбуждены все входящие в них связи (активны источники), а само возбужденное состояние сохраняется в течение некоторого времени. Длительность этого периода

остаточной активности, как будет видно далее, играет важную роль при воспроизведении маршрута.

**Описание процесса запоминания.** Изначально все элементы ассоциативного типа находятся в невозбужденном состоянии. Более того, нет связи как между ними самими, так и между ними и прочими элементами. В некоторый момент времени возбуждается подмножество сенсорных вершин. Среди множества ассоциативных элементов ищется такой, у которого есть связь со всеми возбужденными элементами сенсорного слоя. Если таковой не найден, то из множества свободных ассоциативных элементов выбирается некоторый, и ему назначаются связи с текущими активными элементами сенсорного слоя. При этом сформированный элемент получает тип – ассоциацию 1-го уровня.

В общем виде элементы ассоциативного слоя  $T$  описываются тройкой вида

$$t = \langle I, L, a \rangle \quad (2)$$

Здесь  $I$  – список вершин сенсорного уровня,  $L$  – уровень элемента,  $a$  – значение активности (0, 1). Для элементов первого уровня ассоциаций  $I = \{s_i / s_i \in S, s_i = 1\}$ ,  $L = 1$ . Будем обозначать такие элементы как  $t^1_i$ , где верхний индекс указывает на их принадлежность к уровню 1. Таким образом, элементы  $t^1$  отвечают за представление текущего наблюдаемого кадра.

Фактически, здесь происходит отображение множества сенсоров  $S$  в множество элементов 1-го уровня  $L1 = \{t^1_i\}$ . Запишем это в операторной нотации:

$$L1 = F(S) \quad (3)$$

Поскольку активность ассоциативных вершин сохраняется в течение некоторого времени, то одновременно могут быть активны несколько вершин уровня  $L1$ . Аналогичным образом формируются ассоциативные вершины уровня 2:

$$L2 = F(L1) \quad (4)$$

Если вершины уровня  $L1$  – это мгновенное состояние сенсорной системы, то ассоциации уровня 2 определяют уже комбинации (но не последовательности) кадров.

Для определения последовательности наблюдаемых роботом кадров используются специальные элементы-счетчики. Здесь мы подходим к вопросу представления времени. Разумеется, можно ввести элементы, которые будут возбуждаться циклически через некоторые интервалы времени. Некоторые аналоги таких вершин-счетчиков наблюдаются в природе. Так, нейробиологи говорят о наличии специальных временных клеток (time cells), отвечающих за организацию внутренних часов, см. [Hastings, Maywood, Brancaccio, 2019], [Mieda, 2019]. Интересно, что в работе [MacDonald и др., 2011] отмечается роль временных нейронов для устранения неоднозначностей при прохождении маршрута крысами. Наличие внутренних "часов", конечно, весьма упрощает рассуждения и схему

работы, однако чревато появлением дополнительных сложностей и искусственных допущений, связанных с определением периода таймера, привязкой к двигательной активности и пр. Поэтому здесь мы можем попробовать пойти иным путем. Вообще говоря, представление о времени определяется наступлением некоторых внешних или внутренних событий или регистрацией происходящих изменений. Эти события могут возникать неравномерно, но сути это не меняет: если нет регистрируемых изменений, то нет времени. В предлагаемой модели элементы-счетчики  $c_i$  последовательно возбуждаются по наступлению событий – изменению состояния множества вершин уровня 2. Это не противоречит нейробиологическим моделям, в которых описывается наличие активности пространственно-временных нейронов при регистрации внешних событий (изменений) [MacDonald и др., 2011].

Элементы третьего уровня ассоциаций  $L3$  активируются элементами  $L2$ , сигналами от счетчиков  $C$  и эффекторных элементов  $A$ :

$$L3 = F(L2 \cup C \cup A) \quad (5)$$

Условно такая схема образования ассоциаций представлена на Рис. 3,а.

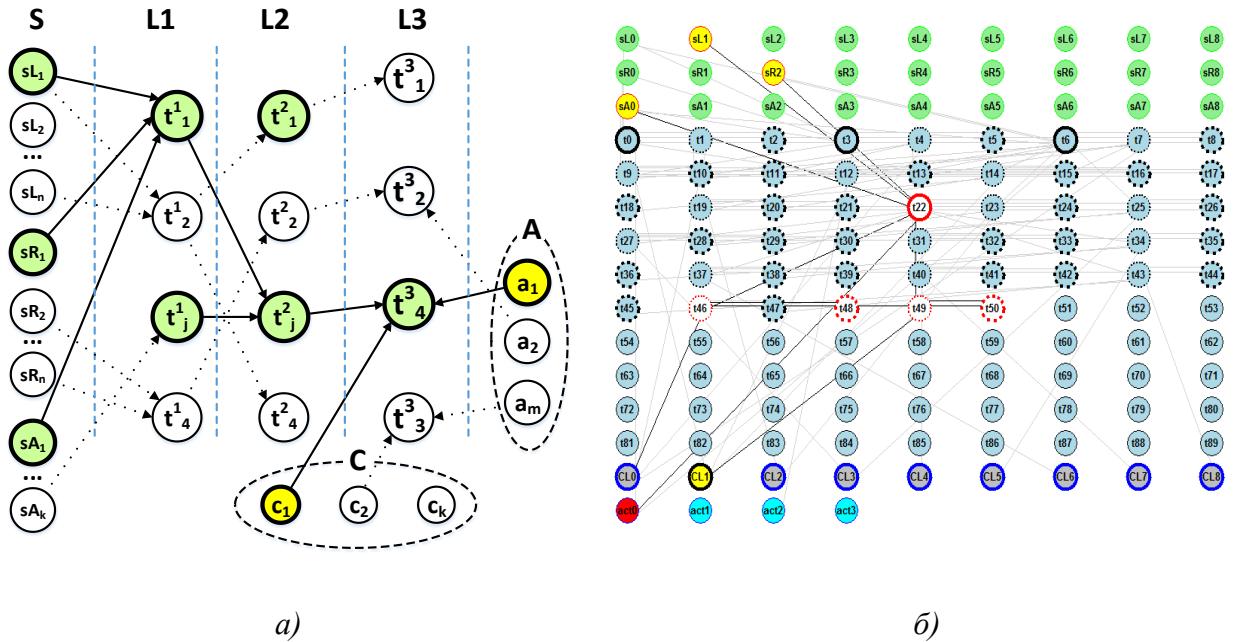


Рис. 3. а) Иллюстративная схема формирования ассоциаций: вершины с именами  $s^*$  – сенсорные элементы (уровень  $S$ ),  $t_i^j$  – рабочие ассоциативные элементы (уровни  $L1$ ,  $L2$ ,  $L3$ ),  $c_i$  – счетчики,  $a_i$  – эффекторные элементы; б) реальная схема: верхние 3 ряда – сенсорные элементы, нижний ряд ( $act1, \dots, act4$ ) – эффекторные элементы, элементы  $CL0, \dots, CL8$  – элементы-счетчики

Реальная схема приведена на Рис.3, б. На ней изображено состояние памяти в некоторый момент времени. Черными линиями показано имеющееся возбуждение сети –

текущая активность. Таким образом, в ходе следования по маршруту формируется его образ в виде множества связей между элементами ассоциативного слоя.

**Воспроизведение маршрута.** Если при запоминании маршрута элементы уровня  $L3$  определялись комбинацией элементов уровней  $C$ ,  $L2$  и  $A$ , то при его воспроизведении, в отсутствие возбуждения  $A$  (задача воспроизведения как раз и заключается в определении требуемой активности элементов  $A$ ), определяются вершины-кандидаты  $L3'$ , которые могли бы быть активированы элементами  $C$  и  $L2$  в данный момент времени. Далее определяется множество вершин  $A'$ , которые связаны с активными вершинами слоя  $L3'$ . При этом, естественно, множество  $A'$  может содержать более одного элемента (конфликтное множество) или быть пустым (неопределенность ситуации). Это связано с возможной неоднозначностью воспроизведения вследствие недостаточности элементов памяти  $T$  и/или элементов-счетчиков. Итак, воспроизведение маршрута заключается не только в однозначном определении выполняемых действий, а в определении моментов времени, когда возникают некоторые события, связанные с необходимостью выбора действия.

Схема воспроизведения маршрута выглядит следующим образом:

#### Шаг 1. Прямая активация элементов

- сформировать значения элементов сенсорного слоя  $S$ :  $S = E(Input)$
- сформировать ассоциации уровня  $L1$ :  $L1 = F(S)$
- сформировать ассоциации уровня  $L2$ :  $L2 = F(L1)$

#### Шаг 2. Формирование перечня вершин-кандидатов $L3$

Определить множество вершин уровня  $L3$ , возбужденных элементами  $C$  и  $L2$ :

$$L3' = F_d(C \cup L2) \text{ (функция } CreateDirectLinks(C \cup L2, L2))$$

#### Шаг 3. Формирование ассоциативных обратных связей слоя эффекторов

Сформировать множество возможных действий  $A'$

$$A' = F_b(L3') \text{ (функция } CreateBackLinks(L3', A'))$$

Псевдокод функций  $CreateDirectLinks$  и  $CreateBackLinks$  приведен ниже. Здесь предполагается, что, в соответствии с (2), каждый элемент задается списком элементов-источников *connections*, уровнем *level* и своим состоянием активности *active*.

```
-- Определение вершин уровня secondary_level, возбуждаемых элементами
-- уровня primary_level_list
-- [primary_level_list] → secondary_level
function CreateDirectLinks(primary_level_list, secondary_level):
    for each e in Elements do
```

```

if e.level ≠ secondary_level then continue endif

oklist ← {}

oklist[i] ← False for each i in primary_level_list

for each c of e.connections do

    for each i in primary_level_list do

        if c.active>0 and c.level=1 then oklist[i] ← True endif

    endfor

endfor

ok ← True

for each i in primary_level_list do

    if not oklist[i]: ok ← False endif

endfor

if ok then e.active ← ACTIVE_TIME_NUM endif

endfor

end

```

```

-- Определение вершин уровня secondary_level,
-- которые являются источниками для вершин уровня primary_level
-- primary_level → secondary_level

function CreateBackLinks(primary_level, secondary_level) :

    for each e in Elements do

        if e.level ≠ primary_level or e.active=0: continue

        for each t of e.connections do

            if t.level=secondary_level then t.active ← ACTIVE_TIME_NUM endif

        endfor

    endfor

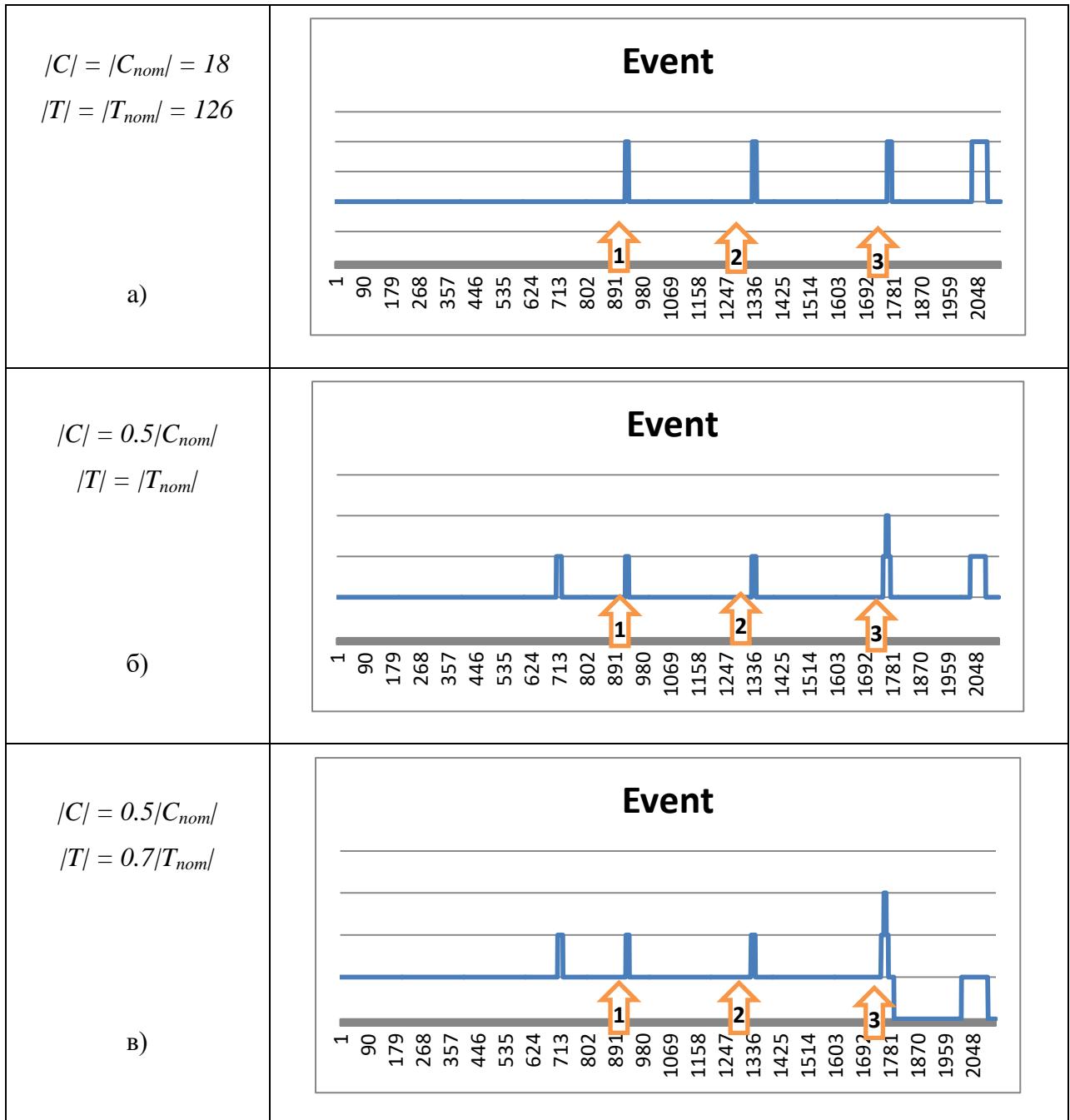
end

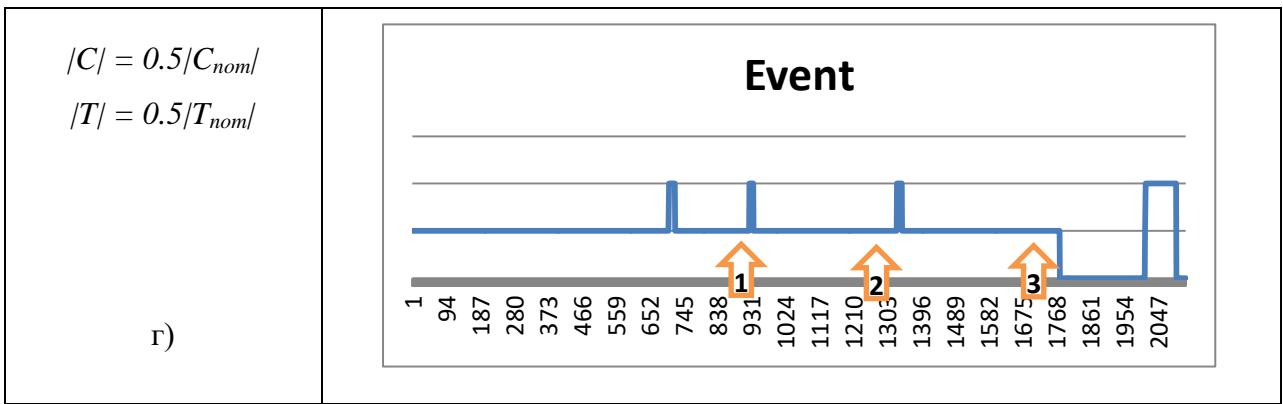
```

Очевидно, что неоднозначность распознавания текущей ситуации зависит от умения "считать" (т.е. от количества элементов-счетчиков), а также от количества ассоциативных элементов.

Рассмотрим пример. При запоминании маршрута в моменты времени 927, 1333 и 1764 робот совершил действия (повороты), Рис. 2. На Рис. 4 эти моменты обозначены стрелками с цифрами 1, 2 и 3. На графиках отложено оцениваемое количество возможных действий робота в каждый момент времени – число активных вершин уровня A. Значение, равное 1 – это однозначно выполняемое действие. Значение, равное 0, означает, что не возбуждена ни одна вершина уровня A (нераспознанная, незнакомая роботу ситуация). Значение, большее 1 – это ситуация неоднозначности.

Для рассматриваемого тестового маршрута номинальные значения числа элементов-счетчиков и ассоциативных элементов равны  $|C_{nom}| = 18$  и  $|T_{nom}| = 126$  соответственно. Этого хватает для запоминания маршрута. В зависимости от количества элементов неоднозначность проявляется так, как показано на Рис. 4:





*Рис. 4. Регистрируемые события. Ось абсцисс – время (такты), ось ординат – неопределенность выполнения действий (количество альтернатив). Нулевое значение обозначает полную неопределенность. Стрелки с цифрами 1,2,3 определяют моменты совершения действий (повороты) при прохождении маршрута*

Рис.4,а иллюстрирует ситуацию с вполне приемлемым количеством элементов ассоциативного слоя и счетчиков. Здесь осталось некоторое количество свободных (нездействованных в ассоциациях) элементов, однако возникла неопределенность в районе такта 2000. Это было обусловлено недостаточностью счетчиков. Вместе с тем, наличие неопределенности – это принципиальный момент, который должен требовать специального разрешения. Так, для данного маршрута однозначные решения появляются при 162 элементах ассоциативного слоя и при 54 счетчиках. Однако простое увеличение числа элементов – это просто уход от проблемы.

На Рис. 4,г представлена совсем "плохая" конфигурация памяти, когда не хватает как ассоциативных элементов, так и элементов-счетчиков (50% от номинального количества). Здесь видно, что провалы (недостаточность информации, значение 0) начинаются в конце серии, когда элементов памяти уже не хватает.

Интересно, что во всех сериях экспериментов распределение ассоциативных элементов по уровням  $L1$ ,  $L2$ ,  $L3$  определяется примерно как 1:2:7, т.е. большую часть составляют элементы уровня  $L3$ .

**Разрешение неоднозначностей.** Итак, предложенное устройство памяти позволяет определить моменты выбора того или иного действия. Непосредственное определение действия в случае неоднозначности основано на анализе последовательных кадров в моменты времени  $t$  и  $t-1$  и определении действия  $a$ , которое приводит к смене кадров:

$$S(t) = a(S(t-1)) \quad (6)$$

Определение действия  $a$  может осуществляться на базе геометрических построений, например, исходя из преобразований координат видимых объектов при выполнении движений (поворот/вперед/назад). При этом в основе этого механизма могут

лежать грубые, приблизительные оценки, в том числе – качественные, относительные, так, как это было предложено в работе [Карпова, 2017b]. В простейшем случае, если действия анимата ограничены лишь поворотами и движением прямо, а сам анимат оснащен "компасом", то задача определения действия становится примитивной. Основной вопрос при такой навигации – это определение момента поворота. Но эту задачу как раз и решает рассмотренный выше механизм воспроизведения маршрута.

**Помехи и неточности восприятия.** Основным неблагоприятным для навигации фактором являются, естественно, неточности измерений (восприятия среды), внешние помехи или динамичность среды в общем случае. Для данной модели это означает, что первичные возбуждения сенсорных элементов при воспроизведении маршрута не будут соответствовать тем, которые осуществлялись в процессе запоминания.

Реакция системы на наличие ошибок восприятия (несоответствие наблюдаемой сцены запомненной) зависит от периода остаточной активности вершин. Без остаточной активности маршрут воспроизводится однозначно лишь при отсутствии ошибок наблюдения. Увеличение периода активности приводит к тому, что кратковременные несоответствия не оказывают существенного влияния на запоминание событий. С другой стороны, очевидно, что причиной неоднозначности воспроизведения является именно остаточная активность вершин.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2. АКТЫ О ВНЕДРЕНИИ

Экз. №

УТВЕРЖДАЮ

Директор Электростальского института

(филиала) Московского

политехнического университета

И.З. Вольшонок

2019 г.



**А К Т**

**о реализации результатов исследований,  
выполненных Карповым Валерием Эдуардовичем**

Комиссия в составе: председателя комиссии – заместителя директора Электростальского института (филиала) Московского политехнического университета Филипповой О.Д., членов комиссии начальника учебно-методического отела Дарымовой Н.С., начальника отдела АСУ Гурова Б.Д., исполняющего обязанности заведующего кафедрой «Прикладная математика и информатика» Ревина С.А, старшего преподавателя кафедры «Прикладная математика и информатика» Жучина А.В., составила настоящий акт о том, что научные результаты, полученные Карповым В.Э., реализованы в Электростальском институте (филиале) Московского политехнического университета при проведении НИР «Разработка экспериментального образца аппаратно-программного комплекса сбора и обработки данных для контроля характеристик и калибровки целевой аппаратуры КА ДЗ3 в части создания макета подвижной платформы для проведения подспутниковых наземных радиометрических измерений» (шифр «Мониторинг-СГ-1.3.1.1-МПП»).

В ходе работы комиссии установлено, что Карпов В.Э. в период с 2014 года по 2017 год осуществлял научное руководство созданием экспериментального образца подвижной платформы для проведения подспутниковых измерений (далее ЭО ПП), а также непосредственно разрабатывал и реализовывал технические, алгоритмические и программные решения в следующем виде:

1. Архитектура и системотехнические решения по разработке ЭО ПП, включая ходовую платформу, вычислительную подсистему, подсистему технического зрения, подсистему GPS-навигации и подсистему электропитания.

2. Программное и алгоритмическое обеспечение бортового контроллера ЭО ПП.

3. Программа и методики проведения испытаний ЭО ПП.

Также Карпов В.Э. подготовил план проведения занятий и организовал занятия по обучению сотрудников Научного центра Оперативного мониторинга Земли работе с ЭО ПП.

Разработанные Карповым В.Э. методы и алгоритмы направлены на автоматизацию сбора данных ЭО ПП с наземных подспутниковых полигонов и были использованы при подготовке программной и конструкторской документации на изделия ЭПИФ.411711.001 (макет подвижной платформы) и ЭПИФ.411711.002 (экспериментальный образец подвижной платформы) (инв. 129156-129209 библиотеки Электростальского института (филиала) Московского политехнического университета).

Председатель комиссии:

Филиппова О.Д.

  
заместитель директора, кандидат филологических наук, доцент

Члены комиссии:

Дарымова Н.С.

  
начальник учебно-методического отдела

Гуров Б.Д.

  
начальник отдела АСУ

Ревин С.А.

  
исполняющий обязанности заведующего кафедрой «Прикладная математика и информатика», кандидат технических наук, доцент, профессор Академии военных наук

Жучин А.В.

  
старший преподаватель кафедры «Прикладная математика и информатика», кандидат технических наук, доцент

**УТВЕРЖДАЮ**

Научный руководитель, директор МИЭМ,

д.т.н., профессор

Е.А. Крук



**А К Т**

**о внедрении результатов диссертационного исследования**

**Карпова Валерия Эдуардовича**

Настоящий акт подтверждает, что научные результаты, полученные Карповым В.Э. при проведении диссертационного исследования, были использованы в учебном процессе в Московском институте электроники и математики им. А.Н. Тихонова Научно-исследовательского университета «Высшая школа экономики» в течение 2017–2019 годов:

- 1) при выполнении проектной работы на тему «Моделирование поведения роботов для задач групповой робототехники» студентами 3-го курса бакалавриата Департамента компьютерной инженерии и Департамента прикладной математики (2018-2019 гг.) (концепция использования моделей социального поведения для управления группой роботов, эмоционально-потребностная архитектура анимата, система многоагентного моделирования "Кворум"),
- 2) в ряде выпускных квалификационных работ (магистерских диссертаций) студентов Департамента компьютерной инженерии:
  - Глухова Е.С. «Распределенная система хранения и обмена данными для группы мобильных роботов» (2017) (концепция статического роя);
  - Чумаченко А.А. «Исследование и разработка базовых моделей и алгоритмов межагентного взаимодействия в системах имитационного моделирования» (2017) (концепция использования моделей социального поведения для управления группой роботов, система многоагентного моделирования "Кворум");
  - Малышев А.А. «Исследование и разработка алгоритмов и моделей поиска источников энергии роботом» (2017) (концепция использования моделей социального поведения для управления группой роботов, система многоагентного моделирования "Кворум");
  - Федорченко А.Ю. «Моделирование подражательного поведения и викарного обучения в группах мобильных роботов» (2018) (концепция

использования моделей социального поведения для управления группой роботов, схема и модель подражательного поведения, эмоционально-потребностная архитектура анимата, система многоагентного моделирования "Кворум").

**Члены комиссии**

Заместитель директора МИЭМ по учебной работе,  
д.т.н., профессор

С.Р. Тумковский

Руководитель ДКИ МИЭМ,  
к.т.н., доцент

В.А. Старых

Руководитель образовательной программы  
«Информатика и вычислительная техника»,  
к.т.н., доцент

Ю.И. Гудков

2709.2019



Экз. №

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора по науке  
НИЦ "Курчатовский институт"

Ю.А. Дьякова

2019 г.



А К Т

о внедрении результатов диссертационного исследования

Карпова Валерия Эдуардовича

в ФГБУ "Национальный исследовательский центр "Курчатовский  
институт"

Комиссия в составе:

- председатель – директор-координатор по направлению природоподобные технологии Демин В.А.

члены комиссии:

- главный научный сотрудник Величковский Б.М.

- главный научный сотрудник Ильин В.А.

- заместитель руководителя КК НБИКС-ПТ – ученый секретарь Пресняков М.Ю.

- первый заместитель руководителя КК НБИКС-ПТ по научной работе Еремин И.И.

- заместитель начальника отдела Готовцев П.М.

настоящим актом подтверждает, что научные результаты, полученные при проведении докторской диссертации Карповым Валерием Эдуардовичем, были использованы при создании математического и программного обеспечения группировки роботов серии YARP, а также средств моделирования в рамках выполнения НИР «Прикладные междисциплинарные исследования в нано-, био-, инфо- и когнитивных технологиях» (Приказ по НИЦ «Курчатовский институт» № 116 от 30.01.2018 г.) в части пункта 1.2 «Разработка робототехнических комплексов, в том числе энергетически автономных, а также систем групповой робототехники с элементами социального поведения с интеллектуальными и гибридными системами управления на основе биоподобных технологий» технического задания этой НИР.

Комиссией установлено, что В.Э. Карпов во время проведения докторской диссертации в период с 2018 по 2019 гг. разработал следующие научно-технические, алгоритмические и программные решения:

1. Создана эмоционально-потребностная архитектура анимата, реализованная в виде модели и соответствующего алгоритмического и программного обеспечения.
2. Созданы модели контагиозного и подражательного поведения аниматоров, методы и алгоритмы голосования в группе искусственных агентов.
3. Разработана унифицированная архитектура мобильных мини-роботов.
4. Создана система многоагентного моделирования "Кворум".

Эффективность внедрения научных результатов В.Э. Карпова отмечена в научно-техническом отчёте по указанной НИР за 2018 г., а также промежуточных отчетах 2019 года на основе результатов тестирования экспериментального образца комплекса.

Председатель комиссии:

Демин В.А.

директор-координатор по направлению  
природоподобные технологии,  
к.ф.-м.н.

Члены комиссии:

Величковский Б.М.

главный научный сотрудник,  
д.п.н., чл.-кор. РАН

Ильин В.А.

главный научный сотрудник,  
д.ф.-м.н.

Пресняков М. Ю.

заместитель руководителя КК НБИКС-  
ПТ – ученый секретарь, к.т.н.

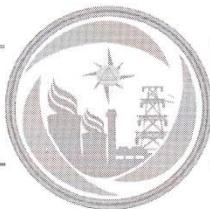
Еремин И. И.

первый заместитель руководителя КК  
НБИКС-ПТ по научной работе, к.м.н.

Готовцев П.М.

заместитель начальника отдела, к.т.н.

«Аварийно-спасательная служба  
Нефтегазового и Топливно-Энергетического  
Комплекса»



141281, Московская область, г. Ивантеевка,  
ул. Санаторный проезд, д. 1  
8-929-50-51-112, 8-929-500-55-56  
E-mail: asf-ngtek@mail.ru

### АКТ

о практическом применении результатов диссертационного исследования Карпова В.Э. на тему  
"Методы группового управления искусственными агентами на основе биологически инспириро-  
ванных моделей поведения"

Настоящим актом удостоверяется, что результаты диссертационного исследования Карпова В.Э. были использованы при разработке пилотного проекта по созданию системы мониторинга прибрежной акватории группой малых автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА).

Для создания системы управления АНПА использовались следующие алгоритмы и модели из диссертационной работы Карпова В.Э:

1. Алгоритм совместного движения группы АНПА с динамическим лидером.
2. Модели и методы сигнальной коммуникации в группах АНПА.
3. Алгоритм формирования лидера в статической группе с целью обеспечения синхронизации при обмене данными.

Генеральный директор  
ООО «ACC НГТЭК»

03.11.2022

Колеснichenko С.К.



Общество с ограниченной ответственностью «ЯРСПАС» (ООО «ЯРСПАС»)  
ИИН 7602141266 / КПП 760601001 ОГРН 1187627001760  
Юридический адрес: 150040, г. Ярославль, ул. Володарского, д.52/55, кв. 7  
Тел.: 8 (4852) 26-05-40, 8 915-980-18-88 E-mail: yar-l-spas@bk.ru

### АКТ

*о практическом применении результатов диссертационного исследования  
Карпова В.Э. на тему "Методы группового управления искусственными агентами на  
основе биологически инспирированных моделей поведения"*

Настоящим актом удостоверяется, что результаты диссертационного исследования Карпова В.Э. актуальны, представляют практический интерес и были использованы при разработке системы управления тренировочной роботизированной наземной мобильной платформы, решающей задачи мониторинга и разведки в условиях угрозы или возникновения ЧС.

При этом использовались следующие алгоритмы и модели из диссертационной работы Карпова В.Э.:

1. архитектура системы управления нижнего уровня (уровень автономного функционирования);
2. модель сопоставления наблюдаемого человека в категориях "свой-чужой-нейтральный" (сituативная реакция);
3. алгоритм совместного группового движения (командное поведение);
4. модель сигнальной коммуникации (взаимодействие с оператором).

Директор ООО «ЯРСПАС»



Вавилов А.А.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Argonne National Laboratory. Repast Simphony [Электронный ресурс]. URL: [http://repast.sourceforge.net/repast\\_simphony.php#](http://repast.sourceforge.net/repast_simphony.php#) (дата обращения: 01.01.2016).
2. Borboni A., Faglia R. Parasitic Phenomena in the Dynamics of Industrial Devices. : CRC Press, 2011. 398 p.
3. Matthews R.W., Matthews J.R. Insect Behavior. : Springer Netherlands, 2010. Iss. 2. 514 p.
4. Milner F.A., Patton C.A. A new approach to mathematical modeling of host-parasite systems // Comput. Math. with Appl. 1999. Vol. 37. No 2. Pp. 93–110.
5. Adamo S. A. Parasites: evolution's neurobiologists // J. Exp. Biol. 2013. Vol. 216. No 1. Pp. 3–10.
6. Agmon N. et al. Adversarial uncertainty in multi-robot patrol // IJCAI Int. Jt. Conf. Artif. Intell. 2009. Pp. 1811–1817.
7. Agmon N. On Events in Multi-Robot Patrol in Adversarial Environments // Proc. of 9th Int. Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2010) - Volume 2, 2010. Pp. 591–598.
8. Agmon N., Kaminka G.A., Kraus S. Multi-robot adversarial patrolling: Facing a full-knowledge opponent // J. Artif. Intell. Res. 2011. Vol. 42. Pp. 887–916.
9. Agmon N., Kraus S., Kaminka G.A. Multi-Robot Perimeter Patrol in Adversarial Settings // 2008. Pp. 2339–2345.
10. Aleyasin H., Flanigan M.E., Russo S.J. Neurocircuitry of aggression and aggression seeking behavior: nose poking into brain circuitry controlling aggression // Curr. Opin. Neurobiol. 2018. Vol. 49. No 1. Pp. 184–191.
11. Almeida T. De. Infrastructure Monitoring With Multi-Robot Teams // 2004.
12. Alvarado J. M., Ramirez M. J. Aggression , Pleasure , and Cognitive Dissonance // Open Psychol. J. 2014. No 7. Pp. 50–56.
13. Amelin K. et al. Task Allocation Algorithm for the Cooperating Group of Light Autonomous Unmanned Aerial Vehicles // Educ. Dev. Unmanned Aer. Syst. 2013. Vol. 2. Pp. 152–155.
14. Ashby W. R. An Introduction to Cybernetics. London: Chapman & Hall, 1957. Iss. Second imp. – 295 p.

15. ASSISIbf. ASSISIbf Project: Animal and robot Societies Self-organise and Integrate by Social Interaction (bees and fish) [Электронный ресурс]. URL: <http://assisi-project.eu/> (дата обращения: 20.01.2019).
16. Attiya H., Welch J. Distributed Computing: Fundamentals, Simulations and Advanced Topics. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2004.
17. Barteneva D., Lau N., Reis L.P. A Computational Study on Emotions and Temperament in Multi-Agent Systems. // Proceedings of the AISB'07: Artificial and Ambient Intelligence. Newcastle, GB: 2008. Pp. 64–71.
18. Bartholow B.D. The aggressive brain: insights from neuroscience // Curr. Opin. Psychol. 2018. Vol. 19. Pp. 60–64.
19. Basilico N. et al. Extending algorithms for mobile robot patrolling in the presence of adversaries to more realistic settings // Proc. - 2009 IEEE/WIC/ACM Int. Conf. Intell. Agent Technol. IAT 2009. 2009. Vol. 2. Pp. 557–564.
20. Basilico N. et al. Asynchronous Multi-Robot Patrolling Against Intrusions in Arbitrary Topologies // AAAI Conf. Artif. Intell. 2010. Pp. 1224–1229.
21. Basilico N., Gatti N., Amigoni F. Leader-follower strategies for robotic patrolling in environments with arbitrary topologies // Proc. 8th Int. Conf. Auton. Agents Multiagent Syst. 2009. Vol. 1. № Aamas. Pp. 57–64.
22. Batista M.R. et al. A Method to Swarm Robot Escorting by Using the Probabilistic Lloyd Method // XI Simpósio Bras. Automação Intel. Fortaleza. 2013.
23. Bayindir L.A review of swarm robotics tasks // Neurocomputing. 2016. Vol. 172. Pp. 292–321.
24. Bento L. F. H., Prates R.O., Chaimowicz L. Designing interfaces for robot control based on Semiotic Engineering // 2011 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics: IEEE, 2011. Pp. 2068–2075.
25. Blizzard D.A., Adams N. The Maudsley Reactive and Nonreactive strains: A new perspective // Behav. Genet. 2002. Vol. 32. No 5. Pp. 277–299.
26. Bogatyreva O., Shillerov A. Robot swarms in an uncertain word: controllable adaptability // Int. J. Adv. Robot. Syst. 2005. Vol. 2. No 3. Pp. 187–197.
27. Borshchev A. The Big Book of Simulation Modeling: Multimethod Modeling with AnyLogic 6. : Amazon Digital Services LLC, 2015. 614 p.
28. Braitenberg V. Vehicles: Experiments in synthetic psychology. Cambridge, MA: MIT Press, 1984.

29. Branda A.S., Sarcinelli-Filho M. On the Guidance of Multiple UAV using a Centralized Formation Control Scheme and Delaunay Triangulation // J. Intell. Robot. Syst. Theory Appl. 2016. Vol. 84. No 1–4. Pp. 397–413.
30. Breazeal C., Brooks R. A. Robot emotion: A functional perspective // Who Needs Emotions? The Brain Meets the Robot / под ред. J. Fellous, M. Arbib. : Oxford University Press, 2005. Pp. 271–310.
31. Breazeal C., Scassellati B. Challenges in Building Robots That Imitate People, in: K. Dautenhahn, C. Nehaniv (Eds.), Imitation in Animals and Artifacts // MIT Press. Cambridge, MA. 2002. Pp. 363–390.
32. Brown S. et al. Rational aggressive behaviour reduces interference in a mobile robot team // 2005 Int. Conf. Adv. Robot. ICAR '05, Proc. 2005. Pp. 741–748.
33. Buiu C., Popescu N. Aesthetic Emotions in Human-Robot Interaction. Implications on Interaction Design of Robotic Artists // Int. J. Innov. Comput. Inf. Control. 2011. Vol. 7. No 3. Pp. 1097–1108.
34. Cacace S., Cristiani E., D'Eustacchio D. Myrmecrome: Simulating the Life of an Ant Colony // Imagine Math 2: Between Culture and Mathematics / под ред. M. Emmer. Milano: Springer Milan, 2013. Pp. 201–210.
35. Cadena C. et al. Past, present, and future of simultaneous localization and mapping: Toward the robust-perception age // IEEE Trans. Robot. 2016. Vol. 32. No 6. Pp. 1309–1332.
36. Campa R. The Rise of Social Robots : A Review of the Recent Literature // J. Evol. Technol. 2016. Vol. 26. No I–2016. Pp. 106–113.
37. Cannon W.B. The wisdom of the body. New York: W W Norton & Co, 1932. 312 p.
38. Chatty A. et al. Emergent complex behaviors for swarm robotic systems by local rules // IEEE SSCI 2011 Symp. Ser. Comput. Intell. - RIIS 2011 2011 IEEE Work. Robot. Intell. Informationally Struct. Sp. 2011. Pp. 69–76.
39. Chernova S., Veloso M. Multiagent Collaborative Task Learning through Imitation // 4th International Symposium on Imitation in Animals and Artifacts. 2007.
40. Chevaleyre Y. Theoretical analysis of the multi-agent patrolling problem // Intell. Agent Technol. 2004. (IAT 2004). Proceedings. IEEE/WIC/ACM Int. Conf. 2004. Pp. 302–308.
41. Chiem S., Cervera E. Vision-based robot formations with Bezier trajectories // Proceedings of the 8th Conference on Intelligent and Autonomous Systems. 2004. Pp. 191–198.
42. Christensen A. L., O'Grady R., Dorigo M. SWARMORPH-script: a language for arbitrary morphology generation in self-assembling robots // Swarm Intell. 2008. Vol. 2. No 2–4. Pp. 143–165.

43. Chu H.-N. et al. Swarm Approaches for the Patrolling Problem , Information Propagation vs . Pheromone Evaporation // IEEE International Conference Tools on Artificial Intelligence. 2007. Pp. 442–449.
44. Churaman W.A. Novel Integrated System Architecture for an Autonomous Jumping Micro-Robot // 2010. 93 p.
45. Conover A. To Fathom a Colony's Talk and Toil, Studying Insects One by One / The New York Times, April 27, 2009 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.nytimes.com/2009/04/28/science/28prof.html> (дата обращения: 10.01.2017).
46. Cyberbotics. Webots robot simulator [Электронный ресурс]. URL: <https://www.cyberbotics.com/> (дата обращения: 31.03.2016).
47. DeGroot M. Reaching a Consensus // J. Am. Stat. Assoc. 1974. Vol. 69. No 345. Pp. 118–121.
48. Dennen J. M. G. van der. Theories of Aggression: Ethological and evolutionary theories of aggression // Default J. 2005. 44 p.
49. Dewi T., Risma P., Oktarina Y. Wedge Formation Control of Swarm Robots // 14th Ind. Electron. Semin. Electron. Eng. Polytech. Inst. Surabaya (EEPIS), Indones. 2012. No Ies. Pp. 294–298.
50. Dlussky G. M., Voltzit O. V., Sulkhanov A. V. Organization of group foraging in ants of genus Myrmica // Zool. Zhurnal. 1978. Vol. 57. No 1. Pp. 65–77.
51. Dorigo M. Swarmanoid Project [Электронный ресурс]. URL: <http://www.swarmanoid.org/> (дата обращения: 17.08.2017).
52. DrRobot. DrRobot // X80 WiFi Mobile Robot Development Platform [Электронный ресурс]. URL: [http://www.drrobot.com/products\\_item.asp?itemNumber=X80Pro](http://www.drrobot.com/products_item.asp?itemNumber=X80Pro) (дата обращения: 15.10.2017).
53. Ducatelle F. et al. Mobile stigmergic markers for navigation in a heterogeneous robotic swarm // Swarm Intell. 2011a. Pp. 456–463.
54. Ducatelle F. et al. Communication assisted navigation in robotic swarms: Self-organization and cooperation // IEEE Int. Conf. Intell. Robot. Syst. 2011b. Pp. 4981–4988.
55. Dudek G. et al. A taxonomy for swarm robots // Proc. 1993 IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robot. Syst. (IROS '93). 1993. Vol. 1. Iss C. Pp. 441–447.
56. Elmaliach Y., Agmon N., Kaminka G. A. Multi-robot area patrol under frequency constraints // Ann. Math. Artif. Intell. 2009. Vol. 57. No 3. Pp. 293–320.
57. Elmaliach Y., Shiloni A., Kaminka G. A. A realistic model of frequency-based multi-robot polyline patrolling // Proc. 7th Int. Jt. Conf. Auton. agents multiagent Syst. 1. 2008. Pp. 63–70.

58. Enpsychopedia. Transmarginal Inhibition [Электронный ресурс]. URL: [http://enpsychopedia.org/index.php?title=Transmarginal\\_Inhibition](http://enpsychopedia.org/index.php?title=Transmarginal_Inhibition).
59. Epstein J.M., Axtell R. Growing Artificial Societies: Social Science from the Bottom Up. : The MIT Press, 1996. Iss. 1. 228 p.
60. Espina M.V. et al. Multi-robot teams for environmental monitoring // Stud. Comput. Intell. 2011. Vol. 336. Pp. 183–209.
61. Evans D. Can robots have emotions? // Psychol. Rev. (September, 2004). 2004. Vol. 11. Iss. 1. Pp. 2–5.
62. Fedoseeva E.B. A Technological Approach to the Description of Group Foraging in the Ant *Myrmica rubra* // Entomol. Rev. 2015. Vol. 95. Iss. 8. Pp. 984–999.
63. Garnier S. et al. Collective decision-making by a group of cockroach-like robots // Proc. Swarm Intell. Symp. SIS 2005. IEEE, Los Alamitos. 2005. Pp. 233–240.
64. Gayle R., Moss W., Lin M. C. Multi-robot coordination using generalized social potential fields // 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation: IEEE, 2009. Pp. 106–113.
65. Hastings M. H., Maywood E. S., Brancaccio M. The Mammalian Circadian Timing System and the Suprachiasmatic Nucleus as Its Pacemaker // Biology (Basel). 2019. Vol. 8. Iss. 1. Pp. 13.
66. Hecker J. et al. Formica ex Machina: Ant Swarm Foraging from Physical to Virtual and Back Again. ANTS // Lecture Notes in Computer Science: Springer, 2012. Pp. 252–259.
67. Hernández E., Barrientos A., Cerro J. Del. Selective Smooth Fictitious Play: An approach based on game theory for patrolling infrastructures with a multi-robot system // Expert Syst. Appl. 2014. Vol. 41. Iss. 6. Pp. 2897–2913.
68. Hirth J., Berns K. Motives as intrinsic activation for human-robot interaction // In 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, September 22-26, 2008, Acropolis Convention Center, Nice, France: IEEE, 2008. Pp. 773–778.
69. Hollinger G. A. et al. Design of a Social Mobile Robot Using Emotion-Based Decision Mechanisms // Intelligent Robots and Systems, 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2006; Beijing; China; 9 October 2006 до 15 October 2006. 2006. Pp. 3093–3098.
70. Hughes D. P. et al. Behavioral mechanisms and morphological symptoms of zombie ants dying from fungal infection // BMC Ecol. 2011. Vol. 11. Iss. 1. Pp. 13.
71. JASSS. Journal of Artificial Societies and Social Simulation [Электронный ресурс]. URL: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/JASSS.html> (дата обращения: 06.04.2019).

72. Jevtic A., Andina D. Swarm Intelligence and Its Applications in Swarm Robotics // Cimmacs 07 Proc. 6th Wseas Int. Conf. Comput. Intell. ManMachine Syst. Cybern. 2007. Pp. 41–46.
73. Karpov V. Robot's temperament // Biol. Inspired Cogn. Archit. 2014. Vol. 7. Pp. 76–86.
74. Karpov V. et al. Multi-robot Exploration and Mapping Based on the Subdefinite Models // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics) / Ed. by A. Ronzhin, G. Rigol, R. Meshcheryakov. Budapest: Springer International Publishing, 2016. Pp. 143–152.
75. Karpov V. The parasitic manipulation of an animat's behavior // Biol. Inspired Cogn. Archit. 2017. Vol. 21. Pp. 67–74.
76. Karpov V.E. About Some Mechanisms of Parasite Manipulation of Robot's Behaviour // Proceedings of the 9th World Conference on Intelligent Systems for Industrial Automation (WCIS-2016, Tashkent, Uzbekistan, October 25-27, 2016)/ Ed. by N.Yusupbekov, R.Aliev, J.Kacprzyk. : Kaufering: b-Quadrat Verlag, 2016. Pp. 241–245.
77. Karpov V.E. Can a robot be a moral agent? // Artificial Intelligence. Lecture Notes in Artificial Intelligence (LNAI). 18th Russian Conference, RCAI 2020, Moscow, Russia, October 10–16, 2020, Proceedings / под ред. S. O. Kuznetsov, A. I. Panov, K. S. Yakovlev: Springer, 2020. Pp. 61–70.
78. Karpov V.E., Karpova I.P. Formation of Control Structures in Static Swarms. // Procedia Eng. Vol. 100, 25th DAAAM Int. Symp. Intell. Manuf. Autom. 2014. 2015a. Pp. 1459–1468.
79. Karpov V.E., Valtsev V.B. Dynamic Planning of Robot Behavior Based on an “Intellectual” Neuron Network // Sci. Tech. Inf. Process. 2011. Vol. 38. Iss. 5. Pp. 344–354.
80. Karpov V., Karpova I. Leader election algorithms for static swarms // Biol. Inspired Cogn. Archit. 2015b. Vol. 12. Pp. 54–64.
81. Karpova I. About Realization of Aggressive Behavior Model in Group Robotics // Biologically Inspired Cognitive Architectures (BICA) for Young Scientists. BICA 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing / Ed. by A. V. Samsonovich, V. V. Klimov. Cham: Springer International Publishing, 2018. Pp. 78–84.
82. Karpova I., Karpov V. Some Mechanisms for Managing Aggressive Behavior in Group Robotics // 29th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation, Zadar, Croatia, EU, 24h-27th October 2018. Zadar, Croatia: 2018. Pp. 566–573.
83. Keltner D., Gruenfeld D. H., Anderson C. Power, approach, and inhibition // Psychol. Rev. 2003. Vol. 110. Pp. 265–284.

84. Kim S.-C. et al. Performance analysis of entropy-based multi-robot cooperative systems in a MANET // Int. J. Control. Autom. Syst. 2008. Vol. 6. Iss. 5. Pp. 722–730.
85. Koenig N., Howard A. Design and use paradigms for gazebo, an open-source multi-robot simulator // 2004 IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robot. Syst. (IEEE Cat. No.04CH37566). 2004. Vol. 3. Pp. 2149–2154.
86. Kulinich A.A. A model of agents (robots) command behavior: The cognitive approach // Autom. Remote Control. 2016. Vol. 77. Iss. 3. Pp. 510–522.
87. Kümmel R. et al. On measuring the accuracy of SLAM algorithms // Auton. Robots. 2009. Iss. 27. Pp. 387–407.
88. Kuremoto T. et al. Autonomic behaviors of swarm robots driven by emotion and curiosity // In LSMS/ICSEE'10 Proceedings of the 2010 international conference on Life system modeling and simulation and intelligent computing, and 2010 international conference on Intelligent computing for sustainable energy and environment: Part III. 2010. Pp. 541–547.
89. Kuzmin M. Review. Classification and comparison of the existing SLAM methods for groups of robots // 22nd Conference of Open Innovations Association (FRUCT). 2018. Pp. 115–120.
90. Labella T.H., Dorigo M., Deneubourg J.-L. Division of Labour in a Group of Robots Inspired by Ants' Foraging Behaviour // Technical Report No. TR/IRIDIA/2004-013, October 12, 2006.
91. Li S. et al. Particle robotics based on statistical mechanics of loosely coupled components // Nature. 2019. Vol. 567. Pp. 6–11.
92. Lorenz K. On Aggression. London: Routledge, 2002. 306 p.
93. Loukas A. et al. On Distributed Computation of Information Potentials // Proc. 8th ACM SIGACT/SIGMOBILE Int. Work. Found. Mob. Comput. FOMC'12. 2012, Madeira; Port. 19 July 2012, Artic. number 5. 2012.
94. MacDonald C.J. et al. Hippocampal «Time Cells» Bridge the Gap in Memory for Discontiguous Events // Neuron. 2011. Vol. 71. Iss. 4. Pp. 737–749.
95. Machado A. et al. Multi-agent patrolling: an empirical analysis of alternative architectures // 3rd International Conference on Multi-agent-based simulation II (MABS). 2002. Pp. 155–170.
96. Maes P. Artificial life meets entertainment: lifelike autonomous agents // Commun. ACM. 1995. T. 38. № 11. C. 108–114.
97. Marier J. S., Besse C., Chaib-Draa B. Solving the Continuous Time Multiagent Patrol Problem // Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on. : IEEE, 2010.

98. Marino A. et al. Behavioral Control for Multi-Robot Perimeter Patrol : A Finite State Automata approach // 2009. Pp. 831–836.
99. MARS. Сайт MARS (Multiple Autonomous Robots) Laboratory, CIPIA, Пенсильванский университет [Электронный ресурс]. URL: <http://mars.cs.umn.edu/>.
100. Matveev A. S. et al. Safe Robot Navigation Among Moving and Steady Obstacles. : Elsevier, 2015. 358 p.
101. Merriam-Webster. Paradigm [Электронный ресурс]. URL: <https://www.merriam-webster.com/dictionary/paradigm> (дата обращения: 27.08.2019).
102. Mieda M. The Network Mechanism of the Central Circadian Pacemaker of the SCN: Do AVP Neurons Play a More Critical Role Than Expected? // Front. Neurosci. 2019. Vol. 13. Iss. February. Pp. 1–7.
103. Mills A. Complexity Science: an introduction (and invitation) for actuaries. 2010. 220 p.
104. Mondada F. et al. The cooperation of swarm-bots: Physical interactions in collective robotics // IEEE Robot. Autom. Mag. 2005. Vol. 12. Iss. 2. Pp. 21–28.
105. Navarro I., Matia F. An Introduction to Swarm Robotics // ISRN Robot. Artic. ID 608164. 2013. Vol. 2013. Pp. 10.
106. Nelson R.J., Trainor B. C. Neural mechanisms of aggression // Nat. Rev. Neurosci. 2007. Vol. 8. Iss. 7. Pp. 536–546.
107. Nissan. Nissan EPORO Robot Car «Goes to School» on Collision-free Driving by Mimicking Fish Behavior / Advanced Robotic Concept Debuts at CEATEC JAPAN [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).
108. Okun M., Lampl I. Balance of excitation and inhibition [Электронный ресурс]. URL: [http://www.scholarpedia.org/article/Balance\\_of\\_excitation\\_and\\_inhibition](http://www.scholarpedia.org/article/Balance_of_excitation_and_inhibition).
109. Pasqualetti F., Franchi A., Bullo F. On cooperative patrolling: Optimal trajectories, complexity analysis, and approximation algorithms // IEEE Trans. Robot. 2012. Vol. 28. Iss. 3. Pp. 592–606.
110. Portugal D., Rocha R. P. MSP Algorithm : Multi-Robot Patrolling based on Territory Allocation using Balanced Graph Partitioning // ACM Symposium on Applied Computing. 2010. Pp. 1271–1276.
111. Portugal D., Rocha R. P. A survey on multi-robot patrolling algorithms // IFIP Adv. Inf. Commun. Technol. 2011. Vol. 349 AICT. Pp. 139–146.
112. Portugal D., Rocha R. P. Multi-robot patrolling algorithms: examining performance and scalability // Adv. Robot. 2013. Vol. 27. Iss. 5. Pp. 325–336.

113. Portugal D., Rocha R. P. Cooperative multi-robot patrol with Bayesian learning // Auton. Robots. 2016. T. 40. № 5. C. 929–953.
114. Poulin R. Parasite manipulation of host personality and behavioural syndromes. // J. Exp. Biol. 2013. Vol. 216. Iss. Pt 1. Pp. 18–26.
115. Reynolds C. W. Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model // ACM SIGGRAPH Comput. Graph. 1987. Vol. 21. Iss. 4. Pp. 25–34.
116. RofASSS. Review of Artificial Societies and Social Simulation [Электронный ресурс]. URL: <https://rofasss.org/> (дата обращения: 20.02.2019).
117. Rovbo M.A., Ovsyannikova E.E. Simulating robot groups with elements of a social structure using KVORUM // 6th International Young Scientists Conference in HPC and Simulation, YSC 2017, 1-3 November 2017, Kotka, Finland. Kotka, Finland: 2017. Pp. 147–156.
118. Rubenstein M. Kilobot: A low cost robot with scalable operations designed for collective behaviors // Rob. Auton. Syst. 2014. Vol. 62. Iss. 7. Pp. 966–975.
119. Ruch W. Pavlov's Types of Nervous System, Eysenck's Typology and the Hippocrates-Galen Temperaments: an Empirical Examination of the Asserted Correspondence of Three Temperament Typologies // Pergamon Press Ltd, Pers. individ. DIG. 1992. Vol. 13. Iss. 12. Pp. 1259–1271.
120. Russell S.J., Norvig P. Artificial Intelligence: A Modern Approach (3rd Edition). : Prentice Hall, 2010. Iss. 3. 1132 p.
121. Santoro N. Design and Analysis of Distributed Algorithms. : John Wiley & Sons, Ltd, 2006. 608 p.
122. Scheutz M., Schermerhorn P. The More Radical, the Better: Investigating the Utility of Aggression in the Competition among Different Agent Kinds // From Anim. to Animat. 8. Proc. 8th Int. Conf. Simul. Adapt. Behav. 2004. Pp. 445–454.
123. Schrobsdorff H. et al. Inhibition in the dynamics of selective attention: an integrative model for negative priming // Front Psychol, Nov 15. 2012. Vol. 3. Iss. 491.
124. Sempe F., Drogoul A. Adaptive Patrol for a Group of Robots // IEEE/RSJ International Conference Intelligent Robots and Systems. 2003. Pp. 1–5.
125. Sequeira J., Ribeiro I. Semiotics and human-robot interaction // ICINCO 2006, Proceedings of the Third International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, Robotics and Automation, Setúbal, Portugal, August 1-5, 2006. 2006. Pp. 58–65.
126. Shannon C. E. A Universal Turing Machine With Two Internal States // Automata Studies, Shannon C.E. and McCarthy J.; (Eds.), Princeton, N.J.: Princeton U.Press, 1956. Pp. 157–165.

127. Shilov I. A. Population homeostasis // Zool. Zhurnal. 2002. Vol. 81. Iss. 9. Pp. 1029–1047.
128. Shlyakhov N. E., Vatamaniuk I. V., Ronzhin A. L. Survey of Methods and Algorithms of Robot Swarm Aggregation // Journal of Physics: Conference Series. International Conference on Information Technologies in Business and Industry 2016; Tomsk; Russian Federation; 21 September 2016 through 23 September 2016; Code 126875. 2017.
129. Shvets E. Stochastic Multi-Agent Patrolling Using Social Potential Fields. // 29th European Conference on Modelling and Simulation, ECMS 2015, Albena (Varna), Bulgaria, May 26-29, 2015 / Ed. by V. M. Mladenov et al. : European Council for Modeling and Simulation, 2015a. Pp. 42–49.
130. Shvets E. Stochastic multi-agent patrolling using social potential // 29th European Conference on Modelling and Simulation. 2015b. Pp. 521–526.
131. Siciliano B., Khatib O. Springer Handbook of Robotics / Ed. by B. Siciliano, O. Khatib. : Springer International Publishing, 2016. Iss. 2. 2259 p.
132. Simon H. A. The Sciences of the Artificial. : MIT Press, 1996. 231 p.
133. Simonov V. P. Thwarted action and need – informational theories of emotions // Int. J. Comp. Psychol. 1991. Vol. 5. Iss. 2. Pp. 103–107.
134. Sless E., Agmon N., Kraus S. Multi-Robot Adversarial Patrolling: Facing Coordinated Attacks // Auton. Agent. Multi. Agent. Syst. 2014. Pp. 1093–1100.
135. SwarmRobot. Официальный сайт проекта SwarmRobot [Электронный ресурс]. URL: [www.swarmrobot.org](http://www.swarmrobot.org) (дата обращения: 23.08.2017).
136. Tan Y. Handbook of Research on Design, Control, and Modeling of Swarm Robotics. : IGI Global, 2015. Iss. 1. 854 p.
137. Thomas A.L., Davis S.M., Dierick H.A. Of Fighting Flies, Mice, and Men: Are Some of the Molecular and Neuronal Mechanisms of Aggression Universal in the Animal Kingdom? // PLoS Genet. 2015. Vol. 11. Iss. 8. Pp. 1–14.
138. Trianni V., Campo A. Fundamental collective behaviors in swarm robotics // Springer Handbook of Computational Intelligence. : Springer Berlin Heidelberg, 2015. Pp. 1377–1394.
139. Vorobeychik Y., An B., Tambe M. Adversarial Patrolling Games (Extended Abstract) // Aamas. 2012. Pp. 1307–1308.
140. Wendel T. AntMe [Электронный ресурс]. URL: <https://service.antme.net/> (дата обращения: 08.10.2017).

141. Wilson S.W. Knowledge Growth in an Artificial Animal // Adaptive and Learning Systems: Theory and Applications / под ред. K. S. Narendra. Boston, MA: Springer US, 1986. Pp. 255–264.
142. Wilson S.W. Classifier Systems and the Animat Problem // Mach. Learn. 1987. Vol. 2. Iss. 3. Pp. 199–228.
143. Xue R., Cai G. Formation flight control of multi-UAV system with communication constraints // J. Aerosp. Technol. Manag. 2016. Vol. 8. Iss. 2. Pp. 203–210.
144. Yanovski V., Wagner I. A., Bruckstein A. M. A distributed ant algorithm for efficiently patrolling a network // Algorithmica (New York). 2003. Vol. 37. Iss. 3. Pp. 165–186.
145. YARP. Официальный сайт проекта YARP [Электронный ресурс]. URL: <http://www.yarp.it/> (дата обращения: 16.04.2018).
146. Yazbeck J., Scheuer A., Charillet F. Decentralized Near-to-Near Approach for Vehicle Platooning based on Memorization and Heuristic Search // 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). : IEEE, 2014. Pp. 631–638.
147. Yin Z. et al. TRUSTS: Scheduling Randomized Patrols for Fare Inspection in Transit Systems. // Iaai. 2012. Pp. 2348–2355.
148. Yogeswaran M., Ponnambalam S. G. Swarm Robotics: An Extensive Research Review // World Congr. Nat. Biol. Inspired Comput. NaBIC. 2010. Pp. 140–145.
149. Yu H., Jian J., Wang Y. Flocking motion of mobile agents with a leader based on distance-dependent adjacency matrix // Lect. Notes Comput. Sci. 1st Int. Conf. Intell. Robot. Appl. ICIRA 2008. 2008. Vol. 5314 LNAI. Iss. PART 1. Pp. 1165–1174.
150. Yuschenko A. S. To the cooperation mode of robot control (К задаче кооперативного управления роботами) // Экстремальная робототехника. 2015. Vol.. 1. Iss. 1. Pp. 140–146.
151. Zahadat P., Schmickl T. Division of labor in a swarm of autonomous underwater robots by improved partitioning social inhibition // Adapt. Behav. 2016. Vol. 24. Iss. March. Pp. 1–11.
152. Zhang Y., Vaughan R. Ganging up: Team-based aggression expands the population/performance envelope in a multi-robot system // Proc. - IEEE Int. Conf. Robot. Autom. 2006. C. 589–594.
153. Zhiguo S. et al. A survey of swarm robotics system // Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics). 2012. Vol. 7331 LNCS. Iss. PART 1. Pp. 564–572.
154. Zoghby N. El et al. Robot Cooperation and Swarm Intelligence // Wirel. Sens. Robot Networks From Topol. Control to Commun. Asp. 2014. Pp. 168–201.

155. Аверкин А. Н., Гаазе-Рапопорт М. Г., Поспелов Д. А. Толковый словарь по искусственному интеллекту. М.: Радио и связь, 1992. 256 с.
156. Анохин К.В. и др. Проект “Мозг Анимата”: разработка модели адаптивного поведения на основе теории функциональных систем // Восьмая национальная конференция по искусенному интеллекту с международным участием. Москва: Физматлит, 2002. С. 781–789.
157. Анохин П.К. Избранные труды: Кибернетика функциональных систем. М.: Медицина, 1998. 400 с.
158. Апресян Р.Г. Генезис золотого правила // Вопросы философии. 2013. № 10. С. 39–49.
159. Апресян Р.Г. Этика: учебник. М.: КНОРУС, 2017. 356 с.
160. Бернштейн Н.А. Физиология движений и активность. М.: Наука, 1990. 497 с.
161. Бернштейн Н.А. Биомеханика и физиология движений. Избранные психологические труды. Под ред. В.П. Зинченко. Москва-Воронеж: 1997. 608 с.
162. Блумер Г. Коллективное поведение // Американская социологическая мысль: Тексты / Сост. Е. И. Кравченко; под В. И. Добренькова // Пер. Blumer H. Collective Behavior. Chapt. XIX–XXII / New Outline of the Principles of Sociology. – N.Y., 1951. – P. 167-221. М.: Изд-во МГУ, 1994. С. 90–115.
163. Богатырева О.А., Богатырев Н.Р. Муравьи и роботы в мире, полном неопределенности: природа адаптивности группы // Муравьи и защита леса. Материалы XIV Всероссийского мирмекологического симпозиума, Москва, 19-23 августа 2013 г. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2013. С. 14–20.
164. Богатырева О.А., Шиллеров А.Е. Синергетика социальности. Новосибирск: Изд. СО РАН, 1998. 300 с.
165. Бонгард М.М. Проблема узнавания. М.: Наука, 1967. 320 с.
166. Бонгард М.М., Лосев И.С., Смирнов М.С. Проект модели организации поведения — «ЖИВОТНОЕ» // Моделирование обучения и поведения. М.: Наука, 1975. С. 152–171.
167. БСЭ. Патрулирование, БСЭ // Большая Советская Энциклопедия (БСЭ). 1978а.
168. БСЭ. Эскорт, БСЭ // Большая Советская Энциклопедия (БСЭ). 1978б.
169. Бургов Е.В., Малышев А.А. Качественные и количественные характеристики биоинспирированных моделей групповой робототехники // V Всероссийский научно-практический семинар Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта. 2019. С. 139–148.

170. Бутовская М.Л. Агрессия и примирение как базовые свойства социальных систем: человек и другие приматы // Материалы конференции «Антропология на пороге III тысячелетия», Москва, 29-31 мая 2002 г. М.: Старый сад, 2004. С. 125–160.
171. Варшавский В.И. Коллективное поведение автоматов. М.: Наука, 1973. 408 с.
172. Варшавский В.И., Поспелов Д.А. Оркестр играет без дирижера: размышления об эволюции некоторых технических систем и управлении ими. М.: Наука, 1984. 208 с.
173. Величковский Б.М. Когнитивная наука : Основы психологии познания: в 2 т. - Т. 1. М.: Смысл : Издательский центр «Академия», 2006. 448 с.
174. Воробьев В.В. Логический вывод в статическом роe // Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте. Сб. научных трудов VIII-й Международной научно-практической конференции (Коломна, 18-20 мая 2015 г.). В 2-х томах, Т.2. М.: Физматлит, 2015. С. 539–548.
175. Воробьев В.В. Логический вывод и элементы планирования действий в группах роботов // Шестнадцатая национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2018 (24-27 сентября 2018 г., Москва, Россия). Труды конференции. В 2-х томах. М.: НИУ ВШЭ, 2018. С. 88–96.
176. Воробьев В.В., Мигалев А.С. Программный модуль для определения координат роботов на полигоне по видеоданным массива видеокамер /Программа для ЭВМ, №2017662276, 01.11.2017 // 2017.
177. Гаазе-Рапорт М.Г., Поспелов Д.А. От амёбы до робота: модели поведения. М.: Едиториал УРСС, 2004. 296 с.
178. Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. СПб.: Питер, 2000. 384 с.
179. Гельфанд И.М., Пятецкий-Шапиро И.И., Цетлин М.Л. О некоторых классах игр и игр автоматов // Докл. АН СССР. 1963. Т. 152. № 4. С. 845–848.
180. Гиляров М.С. Биологический энциклопедический словарь / под ред. М. С. Гиляров. М.: Советская энциклопедия, 1989. Вып. Изд. 2-е, 864 с.
181. Головина Е.Ю. Метод построения интеллектуальных адаптивных систем управления на основе отношения перехода между моделями // Автоматика и телемеханика. 2001. Т. 62. № 10. С. 65–77.
182. Горюнов Д.Н. Коалиции гнезд – второй организационный уровень в комплексах муравьев *Formica Exsecta* // Муравьи и защита леса. Материалы XIV Всероссийского мирмекологического симпозиума, Москва, 19-23 августа 2013 г. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2013. С. 155–159.
183. Гудолл Д. Шимпанзе в природе: поведение Пер. с англ. М.: Мир, 1992. 670 с.

184. Гусейнов А.А., Апресян Р. Г. Этика. М.: Гардарики, 2000. 472 с.
185. Данилова Н.Н., Крылова А.Л. Физиология высшей нервной деятельности. Ростов-на-Дону: Феникс, 2005. 478 с.
186. Даринцев О.В. Система управления коллективом микророботов // "Штучний інтелект". 2006. № 4. С. 391–399.
187. Джексон П. Введение в экспертные системы. М.: Вильямс, 2001. 624 с.
188. Длусский Г.М. Муравьи рода Formica. М.: Наука, 1967. 233 с.
189. Добрынин Д.А., Карпов В.Э. Управление мобильным роботом на основе механизма центральных моторных программ // II Международная конференция "Системный анализ и информационные технологии" САИТ-2007 (10-14 сентября 2007 г., Обнинск, Россия): Труды конференции. В 2 т. Т.1, 288 с. М.: Издательство ЛКИ, 2007. С. 24–28.
190. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления. М.: Лаборатория базовых знаний, 2002. 832 с.
191. Дьюсбери Д. Поведение животных: Сравнительные аспекты / Пер.с англ. М.: Мир, 1981. 480 с.
192. Евсеев Д.А. Алгоритм навигации мобильного робота на основе рекуррентных нейронных сетей // Интеллектуальные системы и технологии: современное состояние и перспективы - сборник научных трудов (ISYT-2017). СПб.: Политехника-принт, 2017. С. 66–75.
193. Ениколопов С.Н., Кузнецова Ю.М., Чудова Н.В. Агрессия в обыденной жизни. М.: Политическая энциклопедия, 2014. 496 с.
194. Захаров А.А. Муравей, семья, колония. М.: Наука, 1978. 144 с.
195. Захаров А.А. Организация сообществ у муравьев. М.: Наука, 1991. 277 с.
196. Захаров А.А. Муравьи лесных сообществ, их жизнь и роль в лесу. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2015. 404 с.
197. Захаров А.А. Муравей. Семья. Колония. М.: Фитон XXI, 2018. 192 с.
198. Захаров А.А., Захаров Р.А. Влияние зоогенных и климатических факторов на годичный цикл жизни муравейника группы *Formica Rufa* // Муравьи и защита леса. Материалы XIV Всероссийского мирмекологического симпозиума, Москва, 19-23 августа 2013 г. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2013. С. 210–215.
199. Зенкевич С.Л., Чжу Х.Управление движением группы роботов в строю типа "конвой" // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. Т. 18. № 1. С. 30–34.
200. Знаков В.В. Психология понимания: Проблемы и перспективы. М.: Изд-во «Институт психологии РАН», 2005. 448 с.

201. Зорина З.А., Полетаева И.И., Резникова Ж.И. Основы этологии и генетики поведения. Учебник. 2-е изд. М.: Изд-во МГУ: Изд-во «Высшая школа», 2002. 383 с.
202. Ивашкина О.И. и др. Социальная передача страха у мышей: влияние прошлого индивидуального обучения в задаче условно-рефлекторного замирания // Всероссийская с международным участием Конференция: XLIV Итоговая научная сессия «Системная организация физиологических функций». М.: 2019.
203. Ительсон Л.Б. Лекции по общей психологии: Учебное пособие. М.: ООО “Издательство АСТ”, Мн.: Харвест, 2002. 896 с.
204. Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. М.: Физматлит, 2009. 280 с.
205. Кант И. Критика практического разума // Соч.: в 4 т. на немецком и русском языках, Т.3. М.: Московский философский фонд, 1997. 784 с.
206. Карпов В.Э. Импринтинг и центральные моторные программы в робототехнике // IV-я Международная научно-практическая конференция “Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте” (28-30 мая 2007 г.) Сб. научн. трудов, Т.1. М.: Физматлит, 2007. С. 322–332.
207. Карпов В.Э. Эмоции роботов // XII национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2010 (20-24 сентября 2010 г., Тверь): Труды конференции, Т.3. М.: Физматлит, 2010. С. 354–368.
208. Карпов В.Э. Частные механизмы лидерства и самосознания в групповой робототехнике // XIII национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2012 (16-20 октября 2012 г., Белгород): Труды конференции. Белгород: Изд-во БГТУ, 2012. С. 275–283.
209. Карпов В.Э. Управление в статических роях. Постановка задачи // «Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте». Сб. научных трудов VII-й Международной научно-практической конференции (Коломна, 20-22 мая 2013). В 3-х томах. М.: Физматлит, 2013. С. 730–739.
210. Карпов В.Э. Эмоции и темперамент роботов. Поведенческие аспекты // Известия РАН. Теория и системы управления. 2014. № 5. С. 126–145.
211. Карпов В.Э. Знак-ориентированный механизм локального взаимодействия между роботами // Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте. Сб. научных трудов VIII-й Международной научно-практической конференции (Коломна, 18-20 мая 2015 г.). В 2-х томах. М.: Физматлит, 2015а. С. 504–514.

212. Карпов В.Э. Об одной реализации знак - ориентированной системы управления мобильного робота // Искусственный интеллект и принятие решений. 2015б. Т. 3. С. 53–61.
213. Карпов В.Э. Модели социального поведения в групповой робототехнике // Управление большими системами. 2016а. № 59. С. 165–232.
214. Карпов В.Э. Сенсорная модель подражательного поведения роботов // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем = Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS-2016): материалы VI междунар. науч.-техн. Конф. (Минск, 18-20 февраля 2016 г). Минск: БГУИР, 2016б. С. 471–476.
215. Карпов В.Э. Биологически инспирированные подходы в робототехнике // Всероссийский научно-практический семинар «Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта» (БТС-ИИ-2016), 22-23 сент. 2016, г.Иннополис, Республика Татарстан (пленарный доклад). Москва: Издательство «Перо», 2016с.
216. Карпов В.Э. От подражательного поведения к эмпатии в социуме роботов // V Всероссийский научно-практический семинар «Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта» (БТС-ИИ-2019), 22-24 мая 2019. СПб.: Российская ассоциация искусственного интеллекта, 2019а. С. 238–247.
217. Карпов В. Э. Моральные отношениям между искусственным агентами // XI международная конференция «Теоретическая и прикладная этика: Традиции и перспективы – 2019. К грядущему цифровому обществу. Опыт этического прогнозирования»,Санкт-Петербургский Государственный Университ. СПб.: СПб.: ООО «Сборка», 2019б. С. 170–171.
218. Карпов В.Э., Вальцев В.Б. Динамическое планирование поведения робота на основе сети “интеллектуальных” нейронов // Искусственный интеллект и принятие решений. 2009. Т. 2. С. 58–69.
219. Карпов В.Э., Ивашкина О.И. О некоторых механизмах регуляции поведения социума искусственных агентов // 12-я Мультиконференция по проблемам управления (МКПУ-2019), 23-28 сентября 2019. с. Дивноморское: , 2019. С. 98–103.
220. Карпов В.Э., Карпова И.П., Кулинич А.А. Социальные сообщества роботов. М.: УРСС, 2019. 352 с.
221. Карпов В.Э., Ровбо М.А., Овсянникова Е.Е. Система моделирования поведения групп робототехнических агентов с элементами социальной организации Кворум // Программные продукты и системы. 2018. Т. 31. № 3. С. 581–590.
222. Карпов В.Э., Сорокоумов П.С. К вопросу о моральных аспектах адаптивного поведения искусственных агентов // Искусственные общества. 2021. Т. 16. № 2.

223. Карпова И.П. Об одной реализации модели агрессивного поведения в групповой робототехнике // Материалы 10-й Всероссийской мультиконференции по проблемам управления (МКПУ-2017) (11-16 сентября 2017, с.Дивноморское). В 3-х томах. Т.2. – 2017а. С. 289–292.
224. Карпова И.П. К вопросу о представлении маршрута мобильного робота на основе визуальных ориентиров // Мехатроника. Автоматизация. Управление. 2017б. Т. 18. № 2. С. 81–89.
225. Карпова И.П., Карпов В.Э. Агрессия в мире аниматов, или О некоторых механизмах управления агрессивным поведением в групповой робототехнике // Управление большими системами. 2018. Т. 76. С. 173–218.
226. Кассиль Г.Н., Гинтер Е.К. Гомеостаз, БСЭ // Большая советская энциклопедия (БСЭ). 1978.
227. 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.
228. Кузнецов О.П. Интеллектуализация поддержки управляющих решений и создание интеллектуальных систем // Проблемы управления. 2009. № 3.1. С. 64–72.
229. Кузнецов О.П. Ярус – язык описания сложных автоматов // Избранные труды: автоматы, языки и искусственный интеллект. М.: 2016а. С. 464.
230. Кузнецов О.П. Сложные сети и распространение активности // Избранные труды: автоматы, языки и искусственный интеллект. М.: 2016б. С. 464.
231. Кулинич А.А. Компьютерные системы моделирования когнитивных карт: подходы и методы // Проблемы управления. 2010. № 3. С. 2–16.
232. Кулинич А.А. Модель командного поведения агентов в качественной семиотической среде. Часть 2. Модели и алгоритмы формирования и функционирования команд агентов // Искусственный интеллект и принятие решений. 2018. № 1. С. 29–40.
233. Кун Т. Структура научных революций. М.: Прогресс, 1977. 300 с.
234. Леонтьев А.Н. Потребности, мотивы и эмоции. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1971. 40 с.
235. Лоренц К. Агрессия (так называемое «зло»). М.: Республика, 1994. 272 с.
236. Лурия А.Р. Лекции по общей психологии. : Питер, 2007. 320 с.
237. Мак-Фарленд Д. Поведение животных: Психобиология, этология и эволюция: Пер. с англ. М.: Мир, 1988. 520 с.
238. Макаров Д.А., Панов А.И., Яковлев К.С. STRL: Многоуровневая система управления интеллектуальными агентами // Пятнадцатая национальная конференция по

искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2016. Смоленск: Универсум, 2016. С. 179–188.

239. Малышев А.А., Бургов Е.В. К вопросу о параметрах биоинспирированных моделей поведения при моделировании групповой фуражировки // Труды СПИИРАН. 2020. Т. 19. № 1. С. 79–103.

240. Мандель Б.Р. Зоопсихология и сравнительная психология. М.: Флинта, 2014. 304 с.

241. Марков А.В. Эволюция человека. Обезьяны, нейроны и душа, Кн.2. М.: АСТ, 2011. 512 с.

242. Минский М. Сообщество разума. М.: АСТ, 2018. 592 с.

243. Михайлов Б.Б., Назарова А.В., Ющенко А.С. Автономные мобильные роботы - навигация и управление // Известия Южного Федерального Университета. Технические Науки. 2016. № 2 (175). С. 48–67.

244. Мур Б., Файна Б. Психоаналитические термины и понятия: словарь /Пер., с англ. / под ред. Б. Файна. М.: Класс, 2000. 304 с.

245. Нго К.Т., Нгуен В.В., Ронжин А.Л. Рекомендующая программная система оценивания состава гетерогенных робототехнических средств для выполнения сельскохозяйственных операций // Вестник Воронежского государственного университета. Серия Системный анализ и информационные технологии. 2019. № 4. С. 141–149.

246. Нго К.Т., Ронжин А.Л. Модельное и программное обеспечение взаимодействия гетерогенных роботов при выполнении сельскохозяйственных задач // Известия ТулГУ . Технические науки. : Тульский государственный университет, 2019. С. 10–17.

247. Новикова С.С. Социология: история, основы, институционализация в России. М.: Московский психолого-социальный институт; Воронеж: Издательство НПО “МОДЭК”, 2000. 464 с.

248. Нож. Можно ли поселить в лампу дух героя Достоевского? [Электронный ресурс]. URL: <https://knife.media/daemons-machine/> (дата обращения: 16.07.2018).

249. Обуховский К. Психология влечений человека. М.: Прогресс, 1971. 248 с.

250. Овчинников В.И. Глоссарий по биосоциологии: Учебно-методическое пособие. Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2008. 33 с.

251. Осипов Г.С. От ситуационного управления к прикладной семиотике // Новости искусственного интеллекта. 2002. Т. 6. № 54. С. 2–12.

252. Осипов Г.С. Нейрофизиологические и психологические основания знаковой картины мира // Нейроинформатика-2015. 2015.

253. Осипов Г. С. и др. Знаковая картина мира субъекта поведения. М.: Физматлит, 2018. 264 с.
254. Осипов Г.С., Панов А.И., Чудова Н.В. Управление поведением как функция сознания. I. Картина мира и целеполагание // Известия Российской Академии Наук. Теория и системы управления. 2014. № 4. С. 49–62.
255. Павлов И.П. Общие типы высшей нервной деятельности животных и человека (переиздание М.: Директ-Медиа, 2008). М.: 1927. 50 с.
256. Павлов И.П. Лекции о работе больших полушарий головного мозга. Изд.5, испр. 2010. 296 с.
257. 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 сетевентрических и мультиагентных системах”. СПб: ОАО “Концерн ЦНИИ «Электроприбор» “, 2010. С. 10–13.
258. Павловский В.Е., Кирков А.Ю. Тональная мультичастотная акустическая коммуникация роботов // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2013. № 102. С. 32 с.
259. 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.: ВИНИТИ, 1983. С. 5–70.
260. Панов Е.Н. Понятие «сигнал» в аспекте коммуникации животных. О чем идет речь? // Этология и зоопсихология. 2012. № 2 (6). С. 1–35.
261. Панов Е.Н. Эволюция диалога. Коммуникации в развитии: от микроорганизмов до человека. М.: Языки славянской культуры, 2014. 400 с.
262. Пенский О.Г., Черников К.В. Математические модели психологических установок роботов // Искусственный интеллект и принятие решений. 2013. № 2. С. 63–67.
263. Пенский О.Г., Шарапов Ю.А., Ощепкова Н.В. Математические модели роботов с неабсолютной памятью и приложения моделей. Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет (Пермь), 2018. 309 с.
264. Поспелов Г.С. Искусственный интеллект - основа новой информационной технологии. М.: Наука, 1988. 280 с.
265. Поспелов Д.А., Осипов Г.С. Прикладная семиотика // Новости искусственного интеллекта. 1999. № 1.
266. Редько В.Г. Как промоделировать сознание? // Сб. по материалам Симпозиума «Сознание и Мозг» – Ин-т философии РАН, 30 ноября, 2006.

267. 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.
268. Редько В.Г. Модели автономных когнитивных агентов – бионический задел развития искусственного интеллекта // XIII национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2012 (16-20 окт. 2012, Белгород): Труды конференции, Т.4. Белгород: 2012. С. 172–179.
269. Редько В.Г. Моделирование когнитивной эволюции. На пути к теории эволюционного происхождения мышления. М.: УРСС, 2015. 256 с.
270. Резникова Ж.И. Сравнительный анализ различных форм социального поведения у животных // Журнал общей биологии. 2004. Т. 65. № 2. С. 135–151.
271. Ровбо М.А., Овсянникова Е.Е., Чумаченко А.А. Обзор средств имитационного моделирования коллективов роботов с элементами социальной организации // Программные продукты и системы. 2017. Т. 30. № 3. С. 425–434.
272. Роцевский Ю.К. Особенности группового поведения животных. Учебное пособие. Куйбышев: обл. типография им. Мяги, 1978. 98 с.
273. Симонов П.В. Потребностно-информационная теория эмоций // Вопросы психологии. 1982. Т. 6. С. 44–56.
274. Сотская М.Н. Зоопсихология: Учебно-методический комплекс в электронной форме (электронный учебник) по курсу “Зоопсихология и сравнительная психология” // Хрестоматия по зоопсихологии и сравнительной психологии: Учебное пособие МГППУ. Сост. М.Н. Сотская [Электронный ресурс]. URL: [http://www.ido.edu.ru/psychology/animal\\_psychology/index.html](http://www.ido.edu.ru/psychology/animal_psychology/index.html).
275. Степанов Ю.С. Семиотика. М.: Наука, 1971. 168 с.
276. Стефанюк В.Л. Локальная организация интеллектуальных систем. М.: Физматлит, 2004. 328 с.
277. Стефанюк В.Л., Цетлин М.Л. О регулировке мощности в коллективе радиостанций // Проблемы передачи информации. 1967. Т. 3. № 4. С. 59–67.
278. Сырямкин М.В. Коллективы интеллектуальных роботов. Сфера применения / под ред. В. И. Сырямкин. Томск: SST, 2018. 140 с.
279. Тинберген Н. Социальное поведение животных – Social Behavior in Animals, 1953 / Пер. с англ. Под ред. акад. РАН П. В. Симонова. М.: Мир, 1993. 81 с.
280. Топчий М.В. Зоопсихология и сравнительная психология: Учебное пособие. Ставрополь: СКСИ, 2005. 272 с.

281. Уилсон Э. Эусоциальность: Люди, муравьи, голые землекопы и другие общественные животные. М.: Альпина нонфикшн, 2020. 158 с.
282. Фаликман М.В., Печенкова Е.В. Принципы физиологии активности Н.А. Бернштейна в психологии восприятия и внимания: проблемы и перспективы // Культурно-историческая психология. 2016. Т. 12. № 4. С. 48–66.
283. Флиер А.Я. Происхождение культуры: новая концепция культурогенеза // Информационный гуманитарный портал “Знание. Понимание. Умение”. 2012. № 4.
284. Хегенхан Б., Олсон М. Теория научения. СПб.: Питер, 2004. Вып. 6. 473 с.
285. Хлебосолов Е.И. Роль поведения в экологии и эволюции животных // Русский орнитологический журнал. 2005. Т. 14. № 277. С. 49–55.
286. Цетлин М.Л. Исследования по теории автоматов и моделированию биологических систем. М.: Наука, 1969. 316 с.
287. Чеботарев П.Ю. и др. О сравнительной полезности альтруизма и эгоизма при голосовании в стохастической среде // Автоматика и телемеханика. 2018. № 11. С. 123–149.
288. Чернова Н.М., Былова А.М.: Общая экология. М.: Дрофа, 2004. 416 с.
289. Шилов И.А. Эколо-физиологические основы популяционных отношений у животных. М.: Издательство Московского университета, 1977. 262 с.
290. Шилов И.А. Экология. М.: Высш.шк., 1998. 512 с.
291. Эшби У.Р. Введение в кибернетику / Пер. с англ. М.: URSS, 2017. 430 с.

### **Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ**

1. Карпов В.Э. Программа для моделирования поведения реактивных агентов / Программа для ЭВМ, №2019665029, 18.11.2019
2. Карпов В.Э., Сорокоумов П.С. Программа моделирования эмпатического взаимодействия в коллективе агентов с эмоционально-потребностной архитектурой / Программа для ЭВМ, №2022610287, 11.01.2022
3. Воробьев В.В., Карпов В.Э., Наседкин А.С., Ровбо М.А. Программа управления группой подводных роботов на основе биологических моделей поведения / Программа для ЭВМ №2022661337, 20.06.2022.

## ТЕРМИНЫ И СОКРАЩЕНИЯ

### Принятые сокращения

ROS	Robot Operating System – платформа для разработки программного обеспечения роботов.
SLAM	Simultaneous localization and mapping – одновременная локализация и построение карты.
ГР	Групповая робототехника.
ДДФ	Драйвер двигательных функций.
ИПУ	Индивидуальный поисковый участок. Участок территории, на котором агент выполняет свою целевую задачу. В животном мире – поиск и добыча пищи.
КА	Конечный автомат.
КМ	Картина мира – ММ, в которой имеется понятие субъекта деятельности (поведения), т.е. "Я".
ММ	Модель мира. Представление агентом знаний об окружающем мире.
МСП	Модели социального поведения.
СК	Сервисный контроллер.
СР	Статический рой. Зафиксированная в данный момент совокупность агентов и связей между ними.
СТЗ	Система технического зрения.
СУ	Система управления.
ТГ	Территориальный гомеостаз.
ФКД	Фиксированный комплекс действий.
ЦНС	Центральная нервная система.

### Некоторые специфические термины

Агрессия	Внешняя ситуативная оценка характера поведения агента. Обычно – форма проявления антагонизма. Не является механизмом социального взаимодействия.
Доминирование	Феномен, определяющий формирование иерархических (подчиненных) отношений между агентами.
Когезия	Стремление членов группы держаться вместе. В групповом управлении – устоявшийся термин.
Конспецифик	Представитель того же вида.

Контагиозное поведение	Заразное поведение. Примером является реакция агента на сигнал опасности без наблюдения явного стимула.
Лидер (доминант)	Агент, не подчиняющийся правилам группового поведения, а выступающий в роли ориентира.
Подражательное поведение	Поведение, определяемое формированием новых стимул-реактивных связей (ассоциаций, каузальных зависимостей) на основе наблюдения за поведением конспецифика.
Сигнальная коммуникация	Обмен сигналами, определяющими эмоциональное состояние агентов. Считается, что в животном мире нет языкового общения, а есть именно СК.
Социальное обучение	Обучение на примере других.
Социум	Форма организации группы взаимодействующих агентов, основанная на множестве механизмов т.н. социального взаимодействия. Образование С. – один из путей повышения адаптивных способностей системы, альтернатива развитию индивидуальных способностей агента.
Сцена	Множество наблюдаемых объектов и отношений между ними, определяющее контекст для реализации соответствующего поведения.
Эмоции	Феномен, определяющий регуляторный уровень поведения агента. Основан на принятии решения на основе оценки существующих актуальных потребностей, состояния сенсорной системы и баланса между имеющимися и требуемыми ресурсами для удовлетворения этих потребностей.
Эмпатия (симпатическая индукция)	Отзывчивость на эмоциональное состояние конспецифика.
Этология	Раздел биологии, изучающий поведение животных.
Эусоциальное сообщество	Истинно социальное сообщество. Примером является семья насекомых.
Я (субъективное Я)	Компонент модели мира. Знак, определяющий субъекта поведения. С этим знаком связаны образ самого агента, его функциональные возможности, способности к оценке ситуации на основе рефлексии и т.д.