

А. А. МАЛЫШЕВ, Е. В. БУРГОВ
**К ВОПРОСУ О ПАРАМЕТРАХ БИОИНСПИРИРОВАННЫХ
МОДЕЛЕЙ ПОВЕДЕНИЯ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ
ГРУППОВОЙ ФУРАЖИРОВКИ**

Малышев А.А., Бургов Е.В. К вопросу о параметрах биоинспирированных моделей поведения при моделировании групповой фуражировки.

Аннотация. Применение биоинспирированных моделей и методов является одним из подходов к решению задач групповой робототехники. Рассматривается одна из таких задач – моделирование фуражировки – и ее решение путем создания аналогов социальных структур муравьев и моделей кормового поведения. Показаны существенные для данной задачи характеристики семей муравьев – численность особей в социуме и его структура, скорость движения рабочих, дистанция взаимодействия индивидов и площадь территории. Кроме того, описан имеющийся экспериментальный базис – группа роботов и полигон, – использующийся в качестве аппаратной платформы для экспериментов. Рассмотрено несколько моделей кормового поведения – без дифференциации функций фуражиров и с разделением последних на активных и пассивных. Активные фуражиры самостоятельно ищут источники ресурсов, а затем вовлекают в процесс добычи пассивных фуражиров; пассивные, пока не вовлечены в добычу, находятся на базе.

Поведение агентов описано набором конечных автоматов: базовые автоматы реализуют базовые поведенческие функции, мета-автомат описывает поведение на основе базовых автоматов. На экспериментальном базисе были отработаны базовые движения, заданные в автоматной логике. Комплексное тестирование моделей проводилось в среде моделирования Kvoqum, где был создан аналог реального полигона. Моделирование представляло собой серию экспериментов для каждой модели, в которой агенты должны были собирать ресурсы. Серии отличались численностью агентов. Для оценки качества моделей использовалось отношение полученной энергии к среднему времени ее добычи. Эксперименты показали, что модель с дифференциацией функций работает эффективнее.

Ключевые слова: групповая робототехника, биоинспирированный подход, модели поведения, муравьи, фуражировка, сбор ресурсов.

1. Введение. Одним из подходов к решению задач групповой робототехники является применение биоинспирированных моделей и методов [1]. Биоинспирированные роботы (bioinspired robots) – роботы, которые своей морфологией, актуаторами, системой управления, электроникой и другими характеристиками имеют сходство с живыми организмами [2]. При этом модельными объектами выступают общественные насекомые – пчелы, термиты, муравьи.

Биоинспирированный подход включает в себя три основных направления. Первое связано с созданием технических аналогов морфологических структур животных. Второе сосредоточено на вопросах социальной организации групп роботов и разработке соответствующих моделей поведения [1]. Третье – традиционное – направлено на создание методов поисковой оптимизации, основанных на наблюдении за животными: муравьиный алгоритм (Ant Colony Optimization [3]), алгоритм

пчелиной колонии (Bees algorithm [4]), алгоритм светлячка (firefly algorithm [5]) и другие. В различных проектах воссоздаются отдельные природные механизмы: поиск цели в закрытом неисследованном помещении (алгоритм летучей мыши [6]); создание искусственных сооружений [7]; организация коммуникации роботов (посредством светового следа на LCD-экране [8], используя этанол [9]).

Вместе с тем, проводя такие аналогии, авторы нередко опускают существенные детали, играющие важную роль в поведении животных, и делают допущения, которые могут быть подвергнуты серьезной критике. Так, например, есть представление о существенной для муравьев роли химической коммуникации. Для некоторых видов это действительно так [10], но у немалого числа видов доминируют иные коммуникационные системы [11].

Далее будет рассмотрена одна из классических задач групповой робототехники – фуражировка, для решения которой используется биоинспирированный подход, в связи с чем особое внимание уделяется биологической системе, лежащей в основе решения: будут довольно подробно рассмотрены ее характеристики, механизмы, принципы функционирования. После изучения биологической основы задачи будут предложены модели, имеющие в основе реальные биологические процессы. Таким образом в рамках работы должна быть решена конкретная прикладная задача – фуражировка. Под фуражировкой понимается поиск и сбор ресурсов группой роботов с последующей доставкой в место сбора ресурсов – на базу. Работа в первую очередь нацелена на выделение существенных параметров биологической системы, их формализацию, создание модели поведения, основанной на этих параметрах, а не на полноценном, максимально подробном воспроизведении поведения объекта моделирования.

Структура работы: сначала будет уточнена область рассмотрения решаемой задачи; затем рассмотрена фуражировка в биологической системе – семье муравьев; после чего имеющаяся группа роботов будет охарактеризована с точки зрения применения в качестве аппаратной платформы для экспериментов; описаны несколько моделей поведения; наконец, рассмотрены результаты экспериментов – моделирования в среде Kvoqum.

2. Фуражировка. Фуражировка рассматривается в рамках более крупной задачи – поддержание энергетической автономности группы роботов, что определяет взаимодействующие объекты и их отношения. Основные объекты для моделирования фуражировки:

- группа роботов;
- база – место основного информационного обмена, переработки ресурсов;

- полигон – территория, на которой функционирует группа;
- источники ресурсов – места концентрации ресурсов;
- ресурсы – собираемые объекты.

Фуражировка включает в себя такие задачи, как нахождение, сбор, выгрузка ресурсов, определение местоположения базы, информирование членов группы об обнаруженных источниках ресурсов, и выполняется на ограниченной территории группой агентов (роботов). Важную роль играет база – область, куда роботы привозят собранные ресурсы, где они делятся информацией о местоположении источников, мобилизуют других роботов для сбора. Эти и другие задачи фуражировки требуют конкретных технических решений. Обратимся к биологической системе и рассмотрим, как в ней решается задача групповой фуражировки. В качестве модельного объекта выбраны муравьи как насекомые, успешно решающие эту задачу.

Создание биоинспирированной модели поведения стоит начинать с изучения ее биологической основы. Далее подробно рассмотрим те аспекты жизни муравьев, которые могут непосредственно касаться фуражировки.

3. Муравьи как модельный объект в групповой робототехнике. Муравьи – уникальный модельный объект, изучение которого может способствовать решению различных задач групповой робототехники. Для них характерно достижение высшего уровня сложности социальных структур в мире насекомых, они эффективно решают такие задачи, как:

- разведка, контроль, использование и охрана территории;
- добыча и обработка ресурсов, их распределение внутри группы;
- создание инфраструктуры с различными элементами (дороги, тоннели, вспомогательные гнезда), которые способствуют эффективному использованию кормового участка.

Таким образом, муравьи являются перспективным объектом исследования в области групповой робототехники в рамках биоинспирированного подхода. В настоящей работе рассматриваются возможности моделирования аналогов ряда внутрисемейных структуры и элементов инфраструктуры, связанных с организацией фуражировки.

3.1. Модельный объект и его характеристики. В качестве модельного объекта взяты муравьи рода *Formica*, так как они отличаются способностью к формированию поселений разного масштаба и сложности [12], способны эффективно использовать большие территории, уменьшать активность и численность на них других муравьев [13]. Размеры рабочих *Formica* варьируются: 0,45-0,75

см – *Formica exsecta*, 0,4-0,7 см – *F. cunicularia*, 0,45-0,95 см – *F. Pratensis* [14]. В недавнем эксперименте [15] были получены значения скорости движения для этих видов муравьев. При движении по мостику шириной 0,4 см средние значения составили: 3 см/с у *Formica exsecta*; 3,6 см/с у *F. cunicularia*; 4,5 см/с у *F. pratensis*. Усредненные значения, соответственно, составляют 0,62 см для размера тела и 3,7 см/с для скорости. Дальнейшие расчеты производятся на основе этих значений.

3.2. Ориентация и коммуникация. Нередко исследователи обращаются к муравьиному алгоритму [16]. В его основе лежит принцип непрямого взаимодействия между особями посредством изменения окружающей среды (стигмергии) [3], а конкретнее – использование некоторыми видами муравьев химического следа (феромонов) для формирования дорог и мобилизации [10]. Фуражиры муравьев таких родов, как *Lasius* и *Solenopsis*, на обратном пути в гнездо после обнаружения пищи оставляют пахучие метки. Со временем из-за интенсивного использования маршрута количество химических меток увеличивается, и таким образом маршрут со временем становится все более привлекательным для муравьев.

Часто этот механизм полагается основным в процессе самоорганизации сообществ насекомых. Но его изолированное использование практически невозможно как в случае описания функционирования семей муравьев, так и при моделировании. Не все муравьи широко используют феромонный след, но даже и при его использовании должна осуществляться разведка, во время которой особи должны ориентироваться в пространстве. При использовании аналогичного химическому следу механизма для оптимизации поиска группой роботов возникают сложности первичного освоения территории – на местности отсутствует «разметка».

Различные исследования показывают, что муравьи при организации совместных действий одновременно используют разные механизмы коммуникации и ориентации в комплексе. Так, например, муравьи-рабовладельцы *Polyergus*, когда совершают рейды, ориентируются по наземным объектам, используют поляризацию света и химический след [17]. Этот и другие примеры говорят о необходимости при проектировании группы роботов использовать целый комплекс механизмов, дублирующих и дополняющих друг друга.

У муравьев есть ряд способов передачи информации друг другу: тактильный код, кинопис («язык поз»), химический след, звуковые сигналы («стрекотание») [18]. Для муравьев *Formica* особенно важны первые два механизма, поэтому необходимо моделировать системы ближней (информационной) связи и дальней (сигнальной). Передача

информации у муравьев с использованием тактильного кода происходит при непосредственном контакте особей. Коммуникация посредством «языка поз» осуществляется на дистанции до 20 см (около 32 длин тела особи). Оценка последней дистанции приблизительная и требует дополнительных исследований.

3.3. Численность особей и структура семьи. Количество индивидов в социуме и его структура являются важными характеристиками для моделирования. Социум муравьев по своему устройству и происхождению является семьей. Описано три уровня внутрисемейных структур муравьев: клан, колонна и плеяда. Первый уровень – клан – объединение рабочих, основанное на индивидуальном взаимодействии, которое имеет иерархическую структуру. Колонна – координационная система, включающая несколько кланов рабочих. Плеяда – система, состоящая из нескольких колонн [19]. Для начала достаточно смоделировать первую внутрисемейную структуру – клан. В семье численность особей варьирует в зависимости от состояния и жизненной стадии группы, ее вида; в семье-клане – от нескольких десятков до нескольких сотен особей [13]. В рамках настоящей работы численность модельной семьи полагается равной 150-300 рабочих – часто семьи такой численности использовались в лабораторных и полевых экспериментах [11, 18, 20].

Рабочие особи в семьях муравьев выполняют разнообразные функции: забота о самке, потомстве, добыча пищи, строительство и ремонт гнезда. Фуражирами называют особей, занимающихся добычей пищи. Их численность составляет около 10-15% от населения муравейника [13]. То есть в семье-клане из 150-300 особей – около 15-45 фуражиров. Кроме того, среди фуражиров происходит дополнительное функциональное разделение. Две основные группы фуражиров: активные (самостоятельно ищут пищу) и пассивные (добывают пищу после активации – взаимодействия с активным фуражиром) [21].

3.4. Стадии фуражировки у муравьев. В работе Е.Б. Федосеевой [11] выделяются следующие стадии фуражировки:

1. Разведка – разрозненное обследование кормового участка немногими фуражирами.
2. Активация – процедура стимуляции разведчиками внутригнездовых особей.
3. Наведение – массовый выход рабочих из гнезда к найденному источнику ресурсов.
4. Транспортировка – перемещение пищи в гнездо.
5. Насыщение – снижение фуражировочной активности.

3.5. Оценка размера территории модельной семьи муравьев.

При общем вторичном делении территории у многих *Formica* кормовой участок семьи разделяется на индивидуальные поисковые участки (ИПУ). ИПУ – фрагмент, обследуемый и используемый одним фуражиром [13]. Оценить размеры ИПУ сложно, так как они зависят от количества ресурсов на территории, особенностей микрорельефа и так далее. Поэтому для приблизительной оценки площади, необходимой для постановки содержательных экспериментов, рассмотрим семьи муравьев, которые содержатся в лабораторных условиях.

Практика показывает, что для длительного содержания в лабораторных условиях семей *Formica* численностью до 500 рабочих достаточно двух арен размерами 80х40 см каждая. Оценки эти грубые, однако их достаточно для моделирования на качественном уровне – проверки, насколько действенны описываемые механизмы в технической системе.

Таким образом, основные характеристики, связанные с моделированием фуражировки в группе агентов по аналогии с семьей муравьев, следующие:

- основным объединяющим группу элементом инфраструктуры является гнездо;
- численность фуражиров в модельной группе составляет 15-45 особей;
- у муравьев комбинируются различные механизмы ориентации и коммуникации;
- для модельных видов муравьев основные способы обмена информацией – тактильный код и кинописис («язык поз»);
- для модельных видов муравьев усредненные значения линейных размеров и скорости составляют 0,62 см и 3,7 см/с соответственно;
- минимальная оценочная площадь территории для модельной группы муравьев составляет 0.64 м².

Выделенные аспекты используем в последующих разделах при сопоставлении модельной семьи и группы роботов, описания моделей поведения и моделирования.

4. Экспериментальная база. Экспериментальной базой для исследования является группа роботов и испытательный полигон лаборатории робототехники Курчатова Института.

Для модельной семьи муравьев оценим несколько параметров: численность, дистанцию коммуникации индивидов и размер кормового участка. По этим параметрам сопоставим модельное сообщество муравьев с группой роботов.

4.1. Характеристика модельной семьи муравьев. Согласно оценке из предыдущего раздела семье муравьев из 500 особей достаточно территории с суммарной площадью $S_{\text{ку}} = 6400 \text{ см}^2$. Введем понятие единичной площади S' – площадь, занимаемая одним объектом. Для муравьев модельных видов: $S'_m = 0.62^2 = 0,3844 \text{ см}^2$. В семье муравьев в среднем 13% фуражиров, для группы из 500 особей, их количество составит 65. Выразив площадь кормового участка муравьев через единичную площадь индивида $S_{\text{ку}} = 6400 / 0,3844 \approx 16830$ единичных площадей, получим, что на одного фуражира приходится $s \approx 260$ ед. площади кормового участка.

В качестве единицы измерения перемещения индивидов используем относительную скорость – расстояние, выраженное в линейных размерах объекта L , преодолеваемое им за одну секунду. Для муравья она составляет примерно $6 L/c$.

Форма кормового участка у муравьев определяется видовыми качествами и условиями окружающей среды.

4.2. Характеристика группы роботов НИЦ «Курчатовский Институт». Экспериментальная база – гетерогенная группировка мобильных минироботов (рисунок 1).

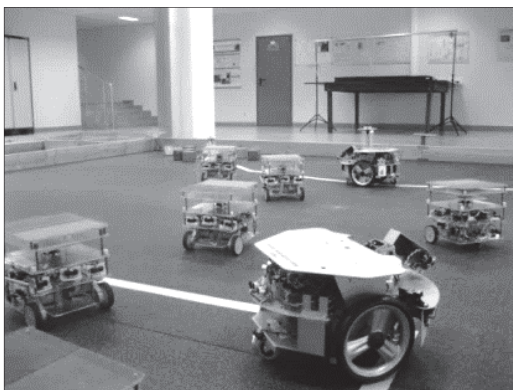


Рис. 1. Группа роботов YARP-2 и Dr.YARP

Численность. Группа состоит из 14 роботов: 10 роботов YARP - 2 и 4 роботов Dr.YARP.

Сенсорика. На YARP-2 сенсорная система представлена пятью ИК-дальномерами дальностью до 80 см. Dr. YARP оснащен четырьмя УЗД датчиками, пятью ИК-дальномерами дальностью до 80 см и камерой.

Коммуникация. Роботы оснащены системой локальной связи (маяком). Маяк – программно-аппаратный комплекс для передачи

данных в ИК-диапазоне. Передаваться могут как команды из ограниченного набора (сигнальная связь, передача 3 битовой команды на расстояние до 270 см), так и информация (информационная связь, передача 12 бит информации на расстояние до 100-150 см).

Линейные размеры, скорость. Размеры (ДхШхВ, см): YARP-2 – 21x21x23, Dr.YARP – 40x30x25. Скорость, см/с: YARP-2 – до 10, Dr.YARP – до 20. Относительная скорость обоих видов роботов составляет примерно 0,5 L/с.

4.3. Расчет площади, необходимой для моделирования фуражировки в группе роботов. Размер территории группы роботов рассчитывается по формуле (1):

$$S_{\text{кy}} = s * \sum S'_j, \quad (1)$$

где s – константа, площадь кормового участка (в ед. площади одного индивида), приходящаяся на одного индивида; S' – площадь, занимаемая одним индивидом.

Таким образом, общая площадь фуражировки группы роботов: $S_{\text{кy}} = s * (10 * S'_{\text{yarp2}} + 4 * S'_{\text{dryarp}}) = 260 * (10 * 441 + 4 * 1200) = 2394600 \text{ см}^2 \approx 240 \text{ м}^2$.

На оценку размера территории группы может существенно влиять скорость перемещения особей. Как показано ранее, для модельных видов муравьев она порядка 6 L/с, в то время как для робота – около 0,5 L/с. Так как скорости отличаются на порядок, сделаем предположение, что размер полигона может так же отличаться, самое больше – на порядок, то есть иметь площадь примерно 24 м².

Несмотря на привлекательность использования столь небольшого полигона, стоит учитывать, что муравьи значительно маневреннее роботов и могут использовать для перемещения не только горизонтальные, но и вертикальные поверхности. Поэтому хотя и можно говорить о допустимости использования полигона существенно меньше расчетного, при выборе его конечного размера стоит руководствоваться здравым смыслом – выбирать размер, достаточный для маневрирования роботов.

4.4. Экспериментальный полигон. Полигон (рисунок 2) имеет размер 4,8x9,0 м (43,2 м²) с ограждением высотой 0.2 м. На его поверхность нанесена разметка – белые полосы с цветовой маркировкой на поворотах, соединяющие базу и поисковые участки. База – отделенная от «кормового участка» часть полигона, на которой располагается маяк (обеспечивает связь с роботами). Источники ресурсов – области полигона, оснащенные маяками, где располагаются ресурсы. Каждый маяк излучает сигнал о том, какой ресурс находится в этой области.



Рис. 2. Полигон с дорожной разметкой

4.5. Сопоставление параметров модельной группы и экспериментального базиса. По обоснованным ранее характеристикам группа роботов близка к условной семье-клану муравьев *Formica*. Сравнение характеристик модельной семьи-клана муравьем *Formica* и группы роботов представлено в таблице 1.

Таблица 1. Сравнение характеристик модельной семьи-клана муравьев *Formica* и группы роботов

Параметр	Модельная семья-клан муравьев <i>Formica</i>		Модельная группа роботов
	<i>Общая</i>	<i>Фуражиры</i>	
Численность группы, ед.	150-300	15-45	14
Доля кормового участка на одного фуражира, ед	260		~ 47
Территория модельной группы, м ²	0,64		43,2
Относительная скорость, L/c	6		0,5
Макс. Дистанция локального взаимодействия (информационная обмен), ед. линейных размеров	0 (непосредственный тактильный контакт)		4
Макс. дистанция передачи коротких сигналов (сигнальная связь), дистанция / линейный размер объекта	~ 32		13

5. Модель кормового поведения. Кормовое поведение способствует обеспечению группы необходимым количеством ресурсов. Далее будут рассмотрены несколько моделей поведения, различающихся степенью сходства с поведением реального объекта.

Во всех моделях используются следующие основные объекты и элементы среды:

- фуражир – индивид, занятый добычей пищи;
- гнездо, базовая станция – место базирования роботов;
- источники ресурсов – области добычи ресурсов;
- ресурсы – собираемые объекты.

В общем случае есть несколько видов ресурсов.

Фуражировка – комплексная задача, проходящая в несколько этапов, соотносимых со стадиями фуражировки муравьев *Myrmica rubra* [9] – таблица 2.

Таблица 2. Соответствие стадий фуражировки муравьев и этапов фуражировки в технической системе

Стадии фуражировки <i>Myrmica rubra</i>	Фуражировка в технической системе	Назначение
Разведка	Поиск ресурсов	Разрозненное обследование кормового участка активными фуражирами
Активация	Информирование	Стимуляция внутригнездовых особей
Наведение	Добыча	Массовый выход рабочих из гнезда к найденному источнику ресурсов
Транспортировка	Транспортировка	Перемещение ресурсов в гнездо
Насыщение	Насыщение	Снижение фуражировочной активности

5.1. Оценка эффективности поведения. Оценку эффективности модели можно выполнить на основе различных показателей. Согласно одной из классических формулировок теории оптимального фуражирования – модели оптимального питания (optimal diet model) – оценка полезности добычи (P) основана на количестве обеспечиваемой жертвой энергии (E) и времени (t_E), затраченном на получение энергии – (2).

$$P = E / t_E. \quad (2)$$

В работе в качестве оценки эффективности моделей рассматривается самая простая формулировка этой теории, при которой полезность ограничивается только временем добычи. В качестве «хищника» выступает вся семья. Такое предположение делается исходя

из того факта, что самостоятельно муравей вне семьи существовать продолжительное время не может, а основное место обмена пищи – гнездо. Дополнительным ограничением является то, что для получения энергии E требуется несколько ресурсов, то есть не имея хотя бы одного из них, энергия не производится. Учитывая все вышесказанное, оценка эффективности моделей выполняется по формуле (3):

$$P = E(R_1, \dots, R_n) / t_E, \quad (3)$$

где R_1, \dots, R_n – добываемые ресурсы; t_E – среднее время добычи одной единицы энергии.

5.2. Базовая модель. Для начала рассмотрим модель, учитывающую только потребность в ресурсах. Введем обозначения:

- $Behavior_{A_i} = (ResNeed_{A_i}, F_{A_i})$ – модель поведения агента A_i ;
- $A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$ – группа индивидов;
- $A_i = (Goal, Hunger, ResNeed)$ – некоторый индивид;
- $B = \{ResNeed\}$ – база;
- $Goal \in \mathbb{R}$ – искомый ресурс (ресурсы пронумерованы);
- $Hunger \in [0; 1] \in \mathbb{R}$ – показатель голода: 0 – не голоден, 1 – очень голоден;
- $ResNeed = \{Res_1, Res_2, \dots, Res_n\}$, $Res_j \in [0; 1] \in \mathbb{R}$ – потребность базы в ресурсах;
- $F = \{F_1, F_2, \dots, F_q\}$ – набор базовых воздействий агента на внешнюю среду. Воздействие является фиксированной последовательностью действий, сформированных на аппаратном уровне;
- n – количество видов ресурсов;
- m – количество агентов в группе;
- $ResNeed_{A_i}$ – хранимая индивидом A_i информация о потребностях базы;
- $ResNeed_{B_i}$ – актуальная информация о потребностях базы.

База, являясь моделью гнезда и внутригнездовых особей одновременно (по крайней мере, частично), определяет потребность группы в ресурсах, а значит, является источником актуального уровня потребностей. Конечно, к семье муравьев понятие «потребность гнезда» практически не применимо. Но в рамках модели необходимо ввести понятие «потребность базы» как обобщение всех сложных процессов и взаимодействий, возникающих в семье муравьев и определяющих индивидуальные потребности особей. Как следствие, под потребностью индивида будем понимать локально хранимую потребность базы, обновляемую во время пребывания на ней ($ResNeed_{A_i} \leftarrow ResNeed_{B_i}$, когда агент находится на базе).

Так как агенты могут оперировать только качественным представлением о недостатке ресурсов (им неизвестно сколько нужно

принести), ResNeed целесообразно представить в виде нормированного вектора:

$$ResNeed = \{Res_j = F_{res}(t), \sum_j Res_j = I\}.$$

Зависимость от времени подчёркивает, что потребность меняется со временем. $F_{res}(t)$ может быть любой. Зададим ее видом (4):

$$F_{res}(t) = \begin{cases} \frac{N_{j,norm} - N_j}{N_{j,norm}}, N_j < N_{j,norm} \\ 0, N_j \geq N_{j,norm} \end{cases}, \quad (4)$$

где N_j – количество j -го ресурса в гнезде; $N_{j,norm}$ – количество j -го ресурса, достаточное для нормальной работы группе.

Алгоритм процедуры фуражировки агента представлен на листинге 1.

```

Алгоритм фуражировки FStep_basic(Ai, B)
Если Ai.Hunger < starving: -- не голодает
    Если SeeResource(Ai) то: -- агент видит ресурс
        PickUpResource -- собирать ресурс
        ReturnToBase(Ai, B) -- вернуться на базу
        UnloadRes(Ai) -- выгрузить ресурс
        Charge(Ai) -- заряжаться
        Цикл пока не Signal(Ai, CollectResource)
            Sleep(Ai) -- ждать
        КЦикл
    Иначе:
        Если Ai.Goal.Curr = Ai.Goal.Prev то: -- агент ищет известный
            ресурс
            MoveToResource(Ai, Curr) -- двигаться к
местоположению ресурса
        Иначе:
            SearchResource(Ai, Curr) -- искать ресурсы
        КЕсли
    КЕсли
Иначе:
    ReturnToBase(Ai, B) -- вернуться на базу
    Charge(Ai) -- заряжаться
    Цикл пока не Signal(Ai, CollectResource)
        Sleep(Ai) -- ждать
    КЦикл
КЕсли
КПроцедура
    
```

Листинг 1. Алгоритм процедуры фуражировки агента

Общий цикл работы группы заключается в вызове процедуры $FStep_basic(A_i, B)$ для $\forall A_i \in \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$, если он не разряжен.

Так как на поиск ресурсов энергия затрачивается каждым роботом, такая модель не эффективна с точки зрения расхода энергии. Введем в модель статус (активный или пассивный фуражир), который позволит ограничить поиск несколькими особями, при этом сбор осуществляется всеми агентами.

5.3. Модель со статусом агентов. Усложним модель, введя статус фуражиров (активный и пассивный) и связанные с ним процедуры обработки:

$$A_i = (Goal, Hunger, ResNeed, State);$$

$$State \in \{Active, Passive\} - \text{состояние агента.}$$

Активный фуражир (АФ) – фуражир, самостоятельно осуществляющий поиск пищи. Пассивный фуражир (ПФ) – особь, фуражировочная деятельность которого инициируется АФ.

Поскольку размер группы роботов ограничен, модель предполагает возможность быстрой смены статуса фуражира с пассивного на активный и обратно. Последний переход в природе маловероятен, однако в рамках модели рассматривается, чтобы позволить малой группе роботов увеличить мобилизационный потенциал.

Алгоритм $FStep_withStatus(A_i, B)$. Фуражировка

Если $A_i.Hunger < starving$: -- не голодает

Если $SeeResource(A_i)$ то: -- агент видит ресурс

$PickUpResource(A_i)$ -- собирать ресурс

$A_i.State \leftarrow Active$ -- активация

$ReturnToBase(A_i, B)$ -- вернуться на базу

$UnloadRes(A_i)$ -- выгрузить ресурс

$Charge(A_i)$ -- заряжаться

Цикл пока не $Signal(A_i, CollectResource)$

$Sleep(A_i)$ -- ждать

Если $A_i.State = Active$

$ActivateRobots(A_i)$ -- дать сигнал активации роботов

вокруг

КЦикл

Иначе:

Если $A_i.Goal.Curr = A_i.Goal.Prev$ то: -- агент ищет известный ресурс

$MoveToResource(A_i, Curr)$ -- двигаться к

местоположению ресурса

Иначе:

```

SearchResource(Ai, Curr) -- искать ресурсы
КЕсли
КЕсли
Иначе:
Ai.State ← Passive – переход в пассивное состояние
ReturnToBase(Ai, B) -- вернуться на базу
Charge(Ai)-- заряжаться
Цикл пока не (Signal(Ai, CollectResource) ИЛИ
Estimate(Signal(Ai, Follow| Resj)))
Sleep(Ai)-- ждать
КЦикл
КЕсли
КПроцедура

```

Листинг 2. Алгоритм фуражировки

Обработка статуса агента включает в себя изменение статуса ($A_i.State \leftarrow Passive$, $A_i.State \leftarrow Active$) и оценку сигнала активации $Estimate(signal)$, где $signal$ – получаемый сигнал активации, содержащий также информацию о ресурсе Res_j , $j \in [0; n]$, за которым предлагается ехать. В этой модели «привлекательность» $Estimate(signal) = A_j.Res_j$, то есть вероятность отправиться на сбор соответствует потребности в ресурсе.

6. Реализация модели кормового поведения. Одной из распространенных, а также наиболее естественной и наглядной формой описания поведения является конечный автомат (КА). В рамках этого представления полагается, что поведение анимата (робота) складывается из ограниченного набора поведенческих последовательностей, составляющих ФКД – фиксированный комплекс действий. Для технической системы ФКД представляет собой библиотеку функций, реализованных в виде КА. Далее для определенности положим под КА понимать автоматы Мили, то есть автоматы, функции воздействия которых исполняются на переходах между состояниями. Так как существуют схожие поведенческие последовательности (например, поиск ресурсов и поиск гнезда, поворот налево и направо), для функций ФКД предпочтительнее использовать обобщенные КА – параметризованные конечные автоматы с предикатными условиями переходов. Параметры таких КА определяют направленность поведения [1]. На рисунке 3 изображен поисковый автомат, используемый далее в модели поведения.

Обобщенный поисковый автомат обеспечивает поиск цели, определенной входным параметром. Состояния S – начальное, T – терминальное, W – для позиционирования на цель и её достижения, $R1, R2, R3$ – смена тактики поиска. Условия перехода

«спереди», «слева», «позади», «справа» срабатывают, когда цель находится по соответствующему направлению – спереди, слева, сзади или справа. Условиям сопоставлены действия – «ехатьВперед», «ехатьНалево», «ехатьНазад», «ехатьНаправо». Переход «если» обрабатывается, когда другие условия не выполняются, «истина» – безусловный переход, «вижу» – обнаружена цель. Действие «ехатьСлучайно» – выбор случайного направления движения, «-» – отсутствие действия на переходе. Переходы $R1 \rightarrow W$, $R2 \rightarrow W$, $R3 \rightarrow W$ связаны с обнаружением объектов, потенциально являющимися искомыми. Переходы T выполняются, если обнаружен искомый объект.

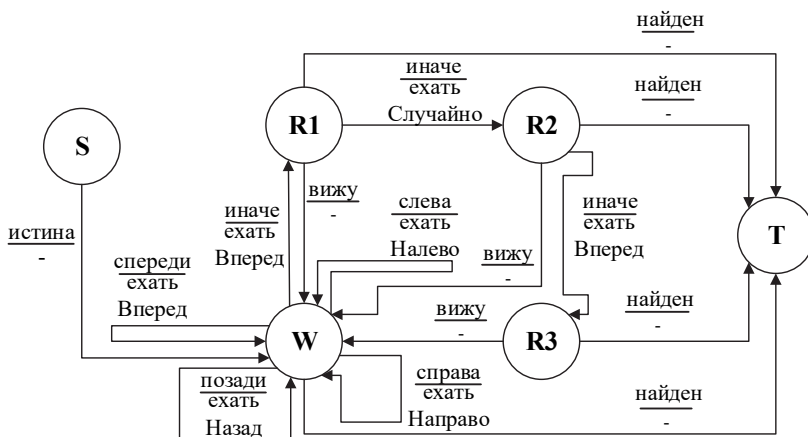


Рис. 3 Обобщенный поисковый автомат

Стоит отметить, что функции перехода, заданные в ФКД, не привязываются к какой-либо аппаратной платформе или программной среде. Они суть объявления, реализация которых зависит от объекта управления. Поэтому описываемые модели абстрактны, а перенесение между средами моделирования и аппаратными платформами несложно – требуется лишь сопоставление функций перехода с исполняющими функциями в среде или на работе.

Поведение агента также описывается автоматом – мета-автоматом. Его особенность в том, что функциями перехода являются только вызовы функции из ФКД, то есть других автоматов. На рисунке 4 представлен пример мета-автомата движения к цели с объездом препятствия.

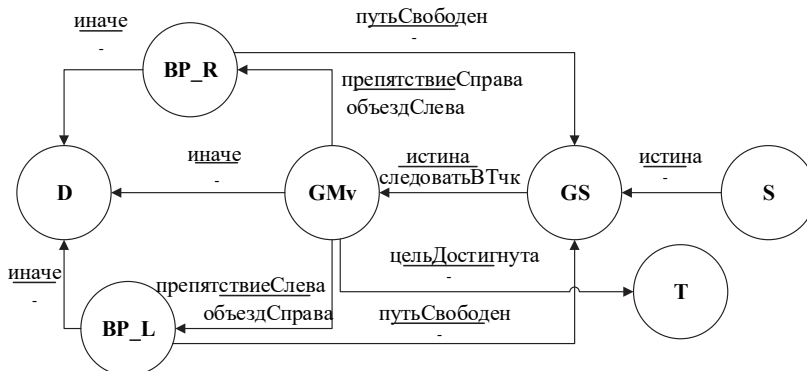


Рис. 4. Мета-автомат движения в точку с объездом препятствий

Координаты конечной точки передаются в автомат извне. Состояния S – начальное, T – терминальное, GS – начало следования, GMv – движение по направлению к точке, BP_R, BP_L – объезд препятствий, D – отладочное (в случае возникновения неизвестных условий). «следоватьВТчк», «объездСлева» и «объездСправа» – загрузка соответствующих автоматов. Условия перехода «препятствиеСправа», «препятствиеСлева» срабатывают при возникновении препятствия, «цельДостигнута» – когда достигнута точка, «путьСвободен» – агент миновал препятствие, «если» обрабатывается, когда другие условия не выполняются, «истина» – безусловный переход. Отсутствие действия на переходе обозначено символом «-».

Непосредственно к моделируемому поведению этот автомат отношения не имеет (хотя и может быть интегрирован в него), однако является простой и понятной демонстрацией поведенческого мета-автомата. Полноценные мета-автоматы, используемые в технических системах, в том числе и описываемый далее, содержат большое число состояний и переходов, из-за чего их сложно изобразить в виде «как есть», поэтому чаще они представляемы фрагментарно или в укрупненном виде.

Для описания поведения, заданного рассмотренными моделями, составлена библиотека автоматов для ФКД, которая включает в себя:

- движение вперед, влево, вправо, назад, остановка;
- поворот на заданный угол;
- обобщенный поисковый автомат;
- движение вдоль объекта;
- «пустышка».

Автомат «пустышка» – автомат с одним переходом $S \rightarrow T$ из начального состояния в терминальное, с ничего не выполняющей функцией перехода. Он позволяет описать общую логику поведения со всеми состояниями, переходами, условиями переходов без вызова конкретных КА и ускорить разработку в целом.

Рассмотренные модели реализуются одним мета-автоматом. Автомат объединяет поведение активных и пассивных фуражиров. Различие поведенческих реакций обеспечивается на уровне исполнительных процедур – на переходах исполняются разные функции, в автоматы передаются разные параметры.

Мета-автомат можно условно разделить на несколько частей:

1) Состояния и переходы, связанные с обменом информацией (рисунок 5). Все переходы этой группы отрабатываются на базе и в рамках рассмотренных моделей включают весь информационный обмен между агентами – обновление информации о потребностях, активация фуражировки.

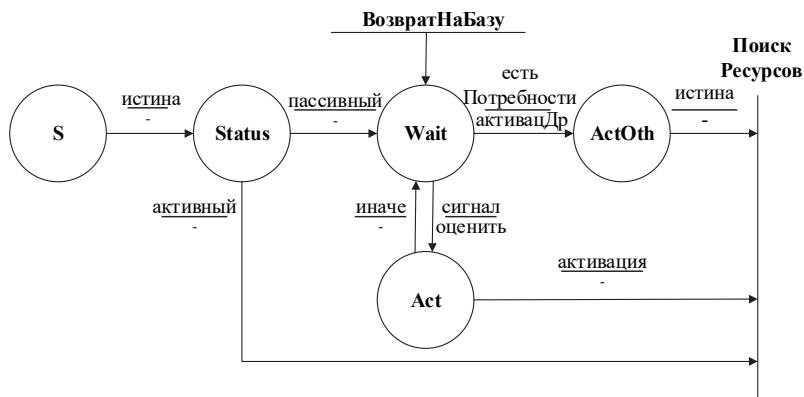


Рис. 5. Укрупненный мета-автомат информационного обмена

S – начальное состояние, $Status$ – выбор типа поведения; $Wait$ – ожидание инициирующего сигнала от активного фуражера или базы; $ActOth$ – активация пассивных фуражиров; Act – оценивание активационного сигнала. Условиями перехода «активный» и «пассивный» выполняется начальное разделение агентов на активных и пассивных, «естьПотребности» срабатывает, когда у гнезда есть потребности в ресурсах, «сигнал» – для выполнения пассивными фуражерами оценки сигнала активации, «истина» – безусловный переход. Отсутствие действия на переходе обозначено «-», «активациДр» – активация пассивных фуражиров, «оценить» – оценка

привлекательности призыва к активации. «ПоискДороги» – переход к другой части автомата, «ВозвратНаБазу» – из другой части.

2) Состояния и переходы, связанные с поиском ресурсов (рисунок 6). Ключевые состояния этой группы – AAct и APass – различают поведение активных и пассивных фуражиров. Переходы в эти состояния связаны с выполнением анализа данных о среде, из них – с обработкой реакций. Для активных фуражиров это в первую очередь выбор и запоминание маршрута, для пассивных – следование маршруту.

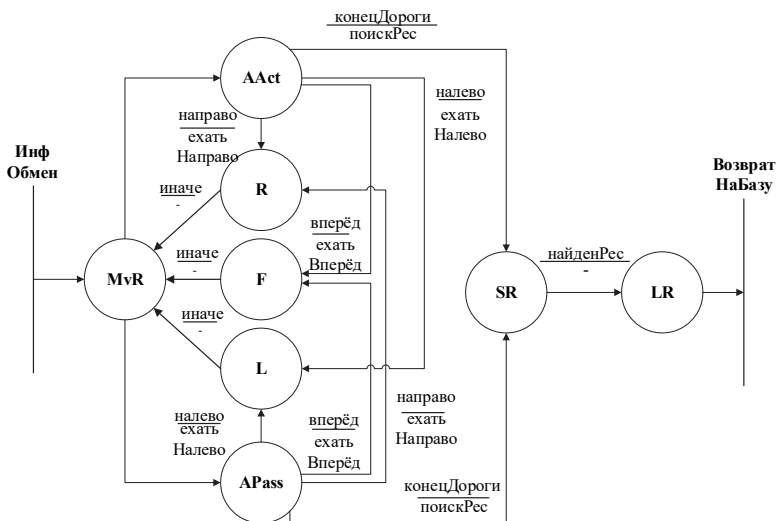


Рис. 6. Укрупненный мета-автомат. Поиск ресурсов

«ИнфОбмен» – предыдущая часть автомата, «ВозвратНаБазу» – следующая. Состояния: MvR – движение по дороге; F, R, L – преодоление перекрёстков, перемещаясь вперёд, вправо, влево; AAct/APass – анализ дороги активными/пассивными фуражиром; SR – поиска ресурса; LR – сбор ресурса. Условия перехода «вперёд», «налево», «направо» верны, когда блок анализа определил соответствующее направление движения; «конецДороги» – агент достиг конца дороги; «найденРесурс» – агент обнаружил искомый ресурс; «если» – когда другие условия не выполняются. «истина» – безусловный переход. Функция перехода «поискРес» – загрузка автомата поиска ресурсов, «-» – отсутствие перехода.

3) Состояния и переходы, связанные с возвратом на базу (рисунок 7). В этой группе ключевое состояние одно – АВ, одинаковое для фуражиров обоих состояний.

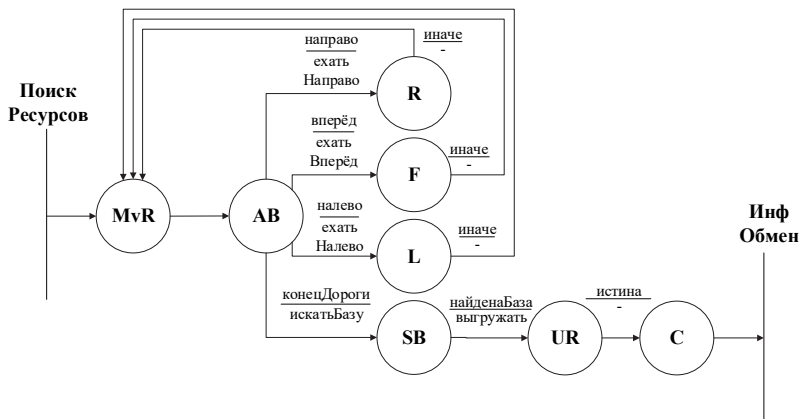


Рис. 7. Укрупненный мета-автомат. Возвращение на базу

Состояния: MvR – движение по дороге; F, R, L – преодоление перекрёстков, перемещаясь вперёд, вправо, влево; AB – анализ ситуации на дороге; SB – поиска базы; UR – разгрузка ресурса; C – подзарядка. Условия перехода «вперёд», «налево», «направо» верны, когда блок анализа определил соответствующее направление движения; «конецДороги» – агент достиг конца дороги; «найденаБаза» – агент обнаружил базу; условие «если» выполнимо, когда другие не выполняются; «истина» – безусловный переход. Функция перехода «искатьБазу» – загрузка автомата поиска базы, «-» – отсутствие перехода.

В рамках экспериментов на экспериментальной базе были отработаны некоторые частные поведенческие алгоритмы и механизмы, реализованные в автоматной логике – базовые движения, езда по линии. Комплексные эксперименты (тестирование как всей поведенческой модели, так и отдельных ее элементов) проводились в среде моделирования Kvozum [22, 23]. В рамках работы большее внимание было уделено моделированию, так как работа с группировкой является менее удобным вариантом тестирования моделей поведения – меньше возможностей по отладке, наблюдению, переконфигурированию системы. Кроме того, моделирование позволяет проводить более масштабные эксперименты – расширять виртуальную группировку намного легче.

В среде создан аналог реального полигона: нанесена разметка с маркерами, источники ресурсов, база. Два типа фуражиров – активный и пассивный – визуально различаются. В силу ограничений

вычислительной мощности проводилось моделирование группировки, включающей 7 агентов: 7 активных для базовой модели и 2 активных и 5 пассивных для модели со статусом.

Моделирование поведения представляло собой серию экспериментов для каждой из двух моделей: базовой и модели со статусом. Изменяемым параметром в экспериментах было количество фуражиров и их соотношение. Эксперименты без пассивных фуражиров относятся к модели базовой, с ними – к модели со статусом. Каждый эксперимент длился 50000 тактов, что примерно соответствует 12 ч реального времени. Параметры агентов – продолжительность работы, скорость перемещения, а также размер полигона, его конфигурация – подбирались в соответствии с их реальными аналогами. Количество видов ресурсов – 2. Агент за раз приносит достаточное количество ресурса одного типа, для производства энергии на одну полную емкость батареи агента. На рисунке 8 представлены результаты – оценка эффективности поведения в зависимости от конфигурации группы роботов. Для вычисления эффективности модели время добычи t_E используется среднее время добычи энергии за время эксперимента.

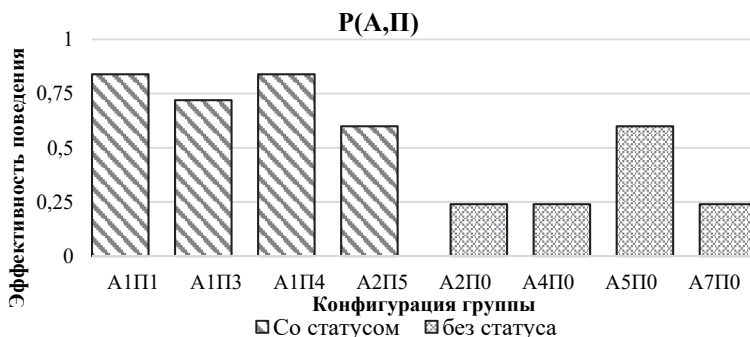


Рис. 8. Эффективность поведения групп роботов разной конфигурации. Число после А – количество активных фуражиров, после П – пассивных

В конфигурациях группы число после символа А – количество активных фуражиров, после П – пассивных. Из диаграммы видно, что модель поведения со статусом эффективнее. В ходе экспериментов с большими группировками (7 и более агентов) наблюдались частые столкновения, что приводило к значительному ухудшению эффективности. Поэтому в результирующую диаграммы они не вошли.

Для конфигураций А1П4 и А5П0 была проведена серия экспериментов для определения продолжительности выживания группы. Результаты представлены на рисунке 9.

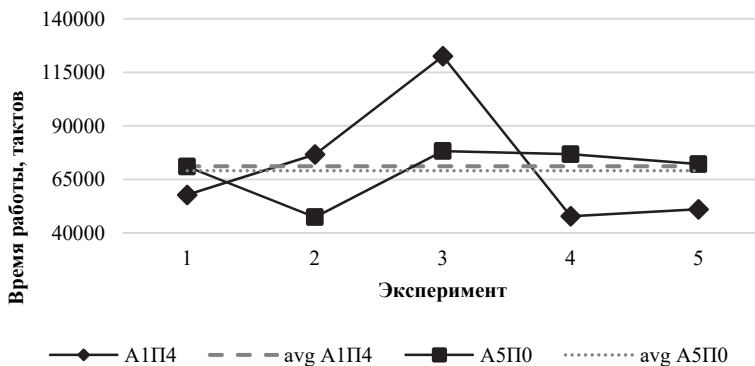


Рис. 9. Время работы модельной группы в основном цикле (пока все агенты «заряжены»)

Группа A5П0 показала более стабильную работу. Но средние значения времени для обеих конфигураций очень близки (разница около 3% от среднего значения), поэтому продолжительность работы примерно одинакова. Как и во время экспериментов для определения эффективности, агенты мешали друг другу, что часто влияло на продолжительность работы – сходя с дороги, агенты терялись, продолжительность поиска ресурсов и базы сильно увеличивались, они разряжались, не восполнив свой запас энергии.

В ходе экспериментов наблюдалась адекватная работа модели – и активные, и пассивные фуражиры успешно обрабатывали поведенческие автоматы.

7. Заключение. Разрабатывая биоинспирированные модели поведения, важно уделять внимание тем механизмам и комплексам механизмов, которые лежат в основе поведения реальных биологических систем. Работа является одной из первых, где выделены и формализованы существенные для фуражировки параметры биологической системы – семьи муравьев – в форме, удобной для специалистов технических наук. При всей своей простоте выделенные параметры являются хорошей отправной точкой для дальнейшего развития подхода, подразумевающего наличие формализованных результатов, на основе которых могут разрабатываться технические системы, а разработанные модели – подтверждением работоспособности механизмов, лежащих в их основе. Работа является примером междисциплинарных исследований – как научные изыскания ученых-мирмекологов ложатся в основу решений конкретных

прикладных задач робототехники. В дальнейшем параметры могут быть использованы для разработки более сложных моделей поведения, чем рассмотренные в работе.

Таким образом, основными результатами работы являются выделение и формализация некоторых механизмов функционирования семьи муравьев, существенных для моделирования фуражировки, и подтверждение работоспособности этих механизмов средствами имитационного моделирования.

Важный вывод, сделанный в ходе работы – семья муравьев являются привлекательным объектом для моделирования биоподобных робототехнических систем как в продолжение работы по моделированию фуражировки, так и при создании аналогов иных биологических механизмов. Созданная модель группы роботов, несмотря на ряд упрощений и допущений, приближена к природным прототипам (семьям муравьев) в сравнении с аналогичными работами в групповой робототехнике. Создание базы как функционального аналога гнезда и внутригнездовых особей у муравьев биоинспирированной системы стимулов для агентов – основа для формирования более сложного поведения. В рамках настоящей работы были рассмотрены лишь отдельные механизмы, а эксперименты показали эффективность предложенных моделей.

Полученные модели апробированы только на программных средствах. Их перенесение на реальную группировку роботов, проведение комплексного тестирования системы, добавление в модель других механизмов, используемых *Formica* и другими муравьями, является следующим этапом развития работы. Также во время экспериментов обнаружилось сложности с моделированием больших группировок – проблема, решение которой требует расширения стандартных функций среды *Kvorum*.

Литература

1. *Карпов В.Э., Карпова И.П., Кулинич А.А.* Социальные сообщества роботов // М.: УРСС. 2019. 352 с.
2. *Floreano D., Mattiussi C.* Bio-Inspired Artificial Intelligence: theories, methods, and technologies // MIT Press. 2008. 659 p.
3. *Dorigo M., Stützle T.* Ant Colony Optimization // IEEE Computational Intelligence Magazine. 2006. vol. 1(4). pp. 28–39.
4. *Karaboga D., Basturk B.* A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: Artificial bee colony (ABC) algorithm // Journal of Global Optimization. 2007. vol. 39. no. 3. pp. 459–471.
5. *Yang X.S.* A new metaheuristic Bat-inspired Algorithm // Nature inspired cooperative strategies for optimization (NICSO 2010). 2010. pp. 65–74.
6. *Suárez P., Iglesias A., Gálvez A.* Make robots be bats: specializing robotic swarms to the Bat algorithm // Swarm and Evolutionary Computation. 2019. vol. 44. pp. 113–129.

7. *Petersen K.H, Nagpal R., Werfel J.K.* TERMES: An Autonomous Robotic System for Three-Dimensional Collective Construction // *Robotics: science and systems VII*. 2011. 8 p.
8. *Arvin F. et al.* COSΦ: Artificial pheromone system for robotic swarms research // 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2015. pp. 407–412.
9. *Fujisawa R. et al.* Designing pheromone communication in swarm robotics: Group foraging behavior mediated by chemical substance // *Swarm Intelligence*. 2014. vol. 8. no. 3. pp. 227–246.
10. *Wilson E.O.* Chemical communication among workers of the fire ant *Solenopsis saevissima* (Fr. Smith) 2. An information analysis of the odor trail // *Animal Behaviour*. 1962. vol. 10. no. 1-2. pp. 148–158.
11. *Федосеева Е.Б.* Технологический подход к описанию групповой фуражировки муравьев *Mutnica rubra* // *Зоологический журнал*. 2015. Т. 94. № 10. С. 1163–1178.
12. *Бургов Е.В.* Пространственно-функциональные структуры у муравьев *Serviformica* (Hymenoptera: Formicidae) // *Вестник МГПИУ. Серия: Естественные науки*. 2016. № 4. С. 19–27.
13. *Захаров А.А.* Муравьи лесных сообществ, их жизнь и роль в лесу // *KMK Scientific Press*. 2015. 404 с.
14. *Collingwood C.A. et al.* The Formicidae (Hymenoptera) of Fennoscandia and Denmark // *Scandinavian Science Press*. 1979. 156 p.
15. *Бургов Е.В.* Функциональные основы экологической сегрегации видов у муравьев: предварительные данные // *Материалы XV Всероссийского мирмекологического симпозиума «Муравьи и защита леса»*. 2018. С. 25–31.
16. *Khaluf Y., Vanhee S., Simoens P.* Local ant system for allocating robot swarms to time-constrained tasks // *Journal of Computational Science*. 2019. vol. 31. pp. 33–44.
17. *Mori A. et al.* Comparison of reproductive strategies and raiding behavior in facultative and obligatory slave-making ants: the case of *Formica sanguinea* and *Polyergus rufescens* // *Insectes Sociaux*. 2001. vol. 48. no 4. pp. 302–314.
18. *Длусский Г.М.* Принципы коммуникации у муравьев // *Доклады на 33-м ежегодном чтении памяти Н.А. Холодковского*. 1981. С. 3–33.
19. *Захаров А.А.* Организация сообществ у муравьев // М.: Наука. 1991. 278 с.
20. *Богатырева О.А., Шиллеров А.Е.* Синергетика социальности // *СО РАН*. 1998. 292 с.
21. *Захаров А.А.* Внутривидовые отношения у муравьев // М.: Наука. 1972. 216 с.
22. *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. 3. № 31. С. 581–590.
23. *Rovbo M.A., Ovsyannikova E.E.* Simulating robot groups with elements of a social structure using KVORUM // *Procedia Computer Science*. 2017. vol. 119. pp. 147–156.

Малышев Александр Александрович – инженер-исследователь, лаборатория робототехники, НБИКСТ-ПТ НИЦ «Курчатовский институт». Область научных интересов: робототехника. Число научных публикаций – 9. a.san.malyshev@mail.ru; пл. Академика Курчатова, 1, 123182, Москва, Россия; р.т.: +7(985)301-11-49.

Бургов Евгений Вадимович – инженер-исследователь, лаборатория робототехники, НБИКСТ-ПТ НИЦ «Курчатовский институт». Область научных интересов: мирмекология. Число научных публикаций – 12. burgov.ev@yandex.ru; пл. Академика Курчатова, 1, 123182, Москва, Россия; р.т.: +7 910 630 01 01.

Поддержка исследований. Работа выполнена при частичном финансировании РФФИ (проект № 17-29-07083 офн_м).

A. MALYSHEV, E. BURGOV
**REVISITING PARAMETERS OF BIOINSPIRED BEHAVIOR
MODELS IN GROUP FORAGING MODELING**

Malyshev A., Burgov E. Revisiting Parameters of Bioinspired Behavior Models in Group Foraging Modeling.

Annotation. Using bioinspired models and methods is one of approaches for solving tasks of swarm robotics. In this paper one of such tasks, modeling of foraging, and it's solving by creating analogues of social structures of ants and models of feeding behavior are considered. The most important characteristics of ants' colonies for modeling were defined – individuals number in society and it's structure, workers' speed, a communication distance and working area size. Besides, existing experimental basis (a group of robots and a polygon) was estimated for a usage as a hardware platform for experiments. Several models of feeding behavior were considered: a model without foragers' functions differentiation and a model with differentiation on active and passive ones. Active foragers look for resources by themselves, then they involve passive foragers; passive foragers are settled on a base, while are not involved in harvesting.

A set of finite state machines describe the behavior of agents: basic automatons (provide basic behavior functions) and a meta- automaton, that switches with some conditions an execution of basic automatons. Basic movements were tested on experimental basis. A complex test of models were conducted in a simulation program Kvorum. An analogue of real polygon was made in the program. Modeling consists of series of experiments for every model in which agents must harvest resources. Series differ from each other by number of agents. For models' quality estimation a ratio of received energy to average obtaining time. Experiments settle that model with functions differentiation works more effective.

Keywords: Group Robotics, Bioinspired Approach, Behavior Modeling, Ants, Foraging, Resource Harvesting.

Malyshev Alexander – Research Engineer, Robotics Laboratory, NBICS NRC «Kurchatov Institute». Research interests: robotics. The number of publications – 9. a.san.malyshev@mail.ru; 1, Akademika Kurchatova pl., 123182, Moscow, Russia; office phone: +7(985)301-11-49.

Burgov Evgenii – Research Engineer, Robotics Laboratory, NBICS NRC «Kurchatov Institute». Research interests: myrmecology. The number of publications – 12. burgov.ev@yandex.ru; 1, Akademika Kurchatova pl., 123182, Moscow, Russia; office phone: +7 910 630 01 01.

Acknowledgements. This research is supported by RFBR (grant № 17-29-07083 офи_м).

References

1. Karpov V.E., Karpova I.P. *Social'nye soobshhestva robotov* [Social Robot Communities]. M.: YRSS. 2019. 352 p. (In Russ.).
2. Floreano D., Mattiussi C. *Bio-Inspired Artificial Intelligence: theories, methods, and technologies*. London: MIT Press. 2008. 659 p.
3. Dorigo M., Stützle T. Ant Colony Optimization. *IEEE Computational Intelligence Magazine*. 2006. vol. 1(4). pp. 28–39.
4. Karaboga D., Basturk B. A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: Artificial bee colony (ABC) algorithm. *Journal of Global Optimization*. 2007. vol. 39. no. 3. pp. 459–471.

- 5 Yang X.S. A new metaheuristic Bat-inspired Algorithm. Nature inspired cooperative strategies for optimization (NICO 2010). 2010. pp. 65–74.
- 6 Suárez P., Iglesias A., Gálvez A. Make robots be bats: specializing robotic swarms to the Bat algorithm. *Swarm and Evolutionary Computation*. 2019. vol. 44. pp. 113–129.
- 7 Petersen K.H, Nagpal R., Werfel J.K. TERMES: An Autonomous Robotic System for Three-Dimensional Collective Construction. *Robotics: science and systems VII*. 2011. 8 p.
- 8 Arvin F. et al. COSF: Artificial pheromone system for robotic swarms research. 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2015. pp. 407–412.
- 9 Fujisawa R. et al. Designing pheromone communication in swarm robotics: Group foraging behavior mediated by chemical substance. *Swarm Intelligence*. 2014. vol. 8. no. 3. pp. 227–246.
- 10 Wilson E.O. Chemical communication among workers of the fire ant *Solenopsis saevissima* (Fr. Smith) 2. An information analysis of the odor trail. *Animal Behaviour*. 1962. vol. 10. no. 1-2. pp. 148–158.
- 11 Fedoseeva E.B. [Technological approach to the description of group foraging of ants *Myrmica rubra*]. *Zoologicheskij zhurnal – Zoological Journal*. 2015. vol. 94. no. 10. pp. 1163–1178. (In Russ.).
- 12 Burgov E.V. [Spatial-functional structures in ants *Serviformica* (Hymenoptera: Formicidae)]. *Vestnik MGPU. Serija «Estestvennye nauki» – Vestnik Moscow City University. Series «Informatics and Informatization of Education»*. 2016. vol. 4. pp. 19–27. (In Russ.).
- 13 Zaharov A.A. *Murav'i lesnyh soobshhestv, ih zhizn' i rol' v lesu* [Ants of forest communities, their life and role in the forest]. KMK Scientific Press. 2015. 404 p. (In Russ.).
- 14 Collingwood C.A. The Formicidae (Hymenoptera) of Fennoscandia and Denmark. Scandinavian Science Press. 1979. 156 p.
- 15 Burgov E.V. [The functional basis of ecological segregation of species in ants: preliminary data]. *Materialy XV Vserossijskogo mirmekologicheskogo simpoziuma*. [Materials of the XV All-Russian Peace-Symposium on Ants and forest protection]. 2018. pp. 25–31. (In Russ.).
- 16 Khaluf Y., Vanhee S., Simoens P. Local ant system for allocating robot swarms to time-constrained tasks. *Journal of Computational Science*. 2019. vol. 31. pp. 33–44.
- 17 Mori A. et al. Comparison of reproductive strategies and raiding behavior in facultative and obligatory slave-making ants: the case of *Formica sanguinea* and *Polyergus rufescens*. *Insectes Sociaux*. 2001. vol. 48. no 4. pp. 302–314.
- 18 Dlusskij G.M. [Principles of Ant Communication]. *Doklady na 33-m ezhegodnom chtenii pamjati N.A. Holodkovskogo*. [Papers at the 33rd annual reading in memory of N.A. Kholodkovsky]. 1981. pp. 3–33. (In Russ.).
- 19 Zaharov A.A. *Organizacija soobshhestv u murav'ev* [Community organization for ants]. M.: Nauka. 1991. 278 p. (In Russ.).
- 20 Bogatyreva O.A., Shillero A.E. *Sinergetika social'nosti* [Synergy of sociality]. SO RAN. 1998. 292 p. (In Russ.).
- 21 Zaharov A.A. *Vnutrividovye otnoshenija u murav'ev* [Intraspecific relationships in ants]. M.: Nauka. 1972. 216 p. (In Russ.).
- 22 Karpov V.E., Rovbo M.A., Ovsjannikova E.E. [System for modeling the behavior of groups of robotic agents with elements of the social organization Kvorum]. *Programmnye produkty i sistemy – Software Products and Systems*. 2018. Issue 3. vol. 31. pp. 581–590. (In Russ.).
- 23 Rovbo M.A., Ovsjannikova E.E. Simulating robot groups with elements of a social structure using KVORUM. *Procedia Computer Science*. 2017. vol. 119. pp. 147–156.