

© Группа авторов, 2014 г. УДК 595.796: 591.5: 57.084

Этолого-энтомологические лаборатории на чипе — трассирующие лабиринтные мирмекодромы для мониторинга динамики колоний в формикариях

Градов О. В.¹, Нотченко А. В.², Линь В. — Дж.³

¹Institute of Mathematical Statistics, USA ²Московский государственный технический университет (МГТУ) им. Н. Э. Баумана, г. Москва, РФ Institute of Electrical and Electronics Engineers, USA ³Cit. Sci. Group on Nonst. LoC, Maryland, USA

данной статье описывается система трассировки передвижения и идентификации по метке муравьёв в формикариях /мирмекодромах, а также в природных муравейниках, базирующаяся на использовании легко изготовляемых лабиринтных дорожек лабораторий на чипе, соответствующих размеру муравья. Флуоресцентное детектирование позволяет обнаруживать и гидировать точку перемещения муравья с помощью программных средств с открытым (преимущественно) кодом. Развитое модульное программное обеспечение для интерпретации данных позволяет описывать результаты не только в терминах обычной энтомологии или частной мирмекологии, но и в рамках понятийного аппарата концепций мультиагентных систем, роевого интеллекта, цифрового ихнологического моделирования и коллективного поведения обучающихся автоматов. Это позволяет исследовать многие

параметры передвижения, недоступные при обычном визуальном исследовании и многих автоматизированных методах, рассматривающих объект трассирования исключительно с биологических позиций. Предложенные конструкции могут также вводиться в комплексы для исследования передвижения в обычных муравейниках, о чем предварительно говорит полученный авторами в ходе тестирования опыт. В таком случае информацию с приборов можно получать также телеметрическим путём - с использованием передачи сигнала через радиочастотный канал. Поэтому данные конструкции можно рекомендовать к апробации и возможному внедрению в практику при самостоятельном изготовлении на правах Open Hardware.

Ключевые слова: трассировка передвижения, формикарии, мирмекодромы, мультиагентные системы, ихнологическое моделирование.

his paper provides an up-to-date description of ant tracking technique using labon-a-chip devices. The methods we have developed provide a basis for entomological LOC application for field and laboratory practice. Much more generally, we may consider some

ant random walks in LOC-labyrinth as a physical model for percolation phenomena in particle dynamics. Also we can see more clearly the geometrical significance of ant behavior in the labyrinth. We have taken this as a starting point for our investigation. The ant phenomenon de-

Контакты: o.v.gradov@gmail.com

scribed above can be interpreted in terms of ant colony optimization algorithms, swarm intelligence computation, CLA (collective learning automata) or multi-agent system simulation (as well as digital ichnological simulation). Here the matter is logically beautiful, because we want to look at ordinary result from a slightly different point of view. For the problem in hand, this procedure is good applicable and finally we draw the reader's attention to the examples we have included. Guided by our earlier experience, we

retrace our steps for a moment to consider the ant tracing problem in some real ant colonies or equally sophisticated artificial «Myrmedromes». It is apparent from the preceding summary that our multidisciplinary approach is strongly recommended for regular use in entomological (myrmecological) practice.

Keywords: tracking technique, entomological LOC application, «Myrmedromes», digital ichnological simulation.

Введение

Начиная с девона, в ископаемых слоях обнаруживаются следы насекомых [46, 16], имеющие, с позиций ихнологии и ихнолитологии [20], высокую идентификационную и палеосистематическую ценность. Анализ этих трасс и следов [47] свидетельствует в пользу того, что нередко уже для достаточно древних организмов были свойственны лабиринтные траектории передвижения и взаимодействия с субстратом.

Впоследствии подобные траектории воплотились в социальном поведении насекомых, например, муравьёв, строящих гнёзда с элементами лабиринтной архитектуры [52]. Передвижение в таких гнездовьях требовало развитых систем социальной сигнализации, которые неизбежно развивались в сопряжении с усложне-

систем социальной сигнализации, которые неизбежно развивались в сопряжении с усложне-

Рис. 1. Лабиринтный формикарий современной конструкции

нием схем социальных взаимодействий муравьёв [34]. Потребность в наличии лабиринтных или лабиринтоподобных гнездовий проявляется у муравьёв и в искусственных условиях [15].

В связи с этим искусственные гнездовья муравьёв, начиная с Жане¹ [35], как правило, конструктивно выполняются в виде лабиринтоподобных конструкций.

Это позволяет наблюдать физиологию и этологию муравьёв через прозрачные стенки таких гнездовий в условиях, максимально приближенных к естественным. При этом для дифференциации муравьёв от фона зачастую используют флуоресцентные метки [14], наносящиеся на брюшко. Подобные гнездовья в советской литературе, начиная с Халифмана, зачастую назывались мирмекодромами (пример советского мирмекодрома второй половины 1950-х гг. показан на рис. 1 b, хотя в ранней литературе они назывались формикариями² [53].



Рис. 1b. Советский мирмекодром середины 1950-х гг.

¹ Хотя Жане нельзя назвать в полном смысле слова специализированным мирмекологом, поскольку он имел также работы в области палеонтологии, физиологии, инженерии и химии (в особенности известны его труды по новому типу записи и интерпретации периодической таблицы химических элементов (Stewart P. J., 2010).

² Ещё ранее, впрочем, под этим понимали понятия, не имеющие отношения к энтомологии (Nider J., 1602).

Длинная экспозиция подобного «мирмекодрома на матрице» в затемнённых ходах и камерах формикария позволяет осуществлять своего рода люминографию, поскольку в темноте флуоресцентные метки на нижней части брюшка оставляют хорошо визуализированные траектории передвижения особи.

Поведение муравьёв в лабиринтах активно изучалось отечественными специалистами. Достаточно упомянуть об исследованиях пространственно-моторной асимметрии при обучении муравьёв в лабиринте [10, 11, 5], пластично-моторной асимметрии муравьёв в лабиринте [3, 21, 9, 13], в т. ч. при его повороте [7], роли мотивации в поведении муравьёв в лабиринте [11, 12, 4] и т. д. Следует отметить, что такие исследования проводились в СССР не только на муравьях, но и на других насекомых и беспозвоночных [1].

Вто же время за рубежом, начиная с 1980-х гг. [51, 26], широко развивался вычислительный тренд данного направления, имевший выраженное прикладное значение³. Поведение муравья в лабиринте, лежащее в основе оптимизации колониальной навигации в муравейнике [54], явилось одной из модельных задач теории роевого интеллекта — т. н. «swarm intelligence» [25], и легло в основу целого ряда алгоритмов программной оптимизации [23, 48].

Клеточно-автоматная модель мирмекологической динамики и формирования лабиринтных паттернов, называемая «муравьём Лэнгтона», с формальных позиций также является двумерной машиной Тьюринга [39], а аналогичная ему «термитная» модель получила название тьюрмитов [22] - в честь А. Тьюринга [17], хотя существовали и иные принципиально аналогичные модели на базе Тьюринговских машин [19]. Она достаточно корректно моделирует динамику муравьиных колоний, в связи с чем на этой основе существует множество вторичных симуляций и оригинальных работ, демонстрирующих различные аспекты этологии муравьёв Лэнгтона и имитируемых ими систем⁴.

Так, в настоящее время исследованы: статистическая механика разделения работы между муравьями Лэнгтона [45], случайные блуждания абстрактного муравья в лабиринтах в перколляционной модели при различной сложности лабиринтов (см. напр., изыскания Barlow М.Т.⁵), различия в поведении муравья Лэнгтона в сетях различной топологии [27, 28], динамика модельного муравья в лабиринтоподобных структурах различной сложности [31, 32], быстрота трассирования передвижения муравья Лэнгтона [18], комплексность и динамическое поведение [21, 27, 28, 29, 39].

В англоязычной специальной литературе возникли сленговое понятие «энти-частицы» (по аналогии с античастицами, называемыми «antiparticles», «муравьиные частицы» имеют название – «anty-particles» [49], и название соответствующего тренда «ant-ics» [30] (в оригинале слово «antics» означает «выходки», «фиглярство», что вовсе не соответствует сущности данного термина). В связи с этим возникла возможность создания устройств, идентифицирующих передвижение муравьёв в лабиринте как частиц, описываемых определённой динамикой, форма и характеристики которой могут быть видоспецифичны или специфичны для различных каст имаго муравьёв и, как следствие, могут служить для систематической идентификации и этологического фингерпринтинга муравьёв.

Материалы и методы (конструкция установки)

Нами предлагается создание принципиально новых мирмекодромных устройств, позволяющих исследовать динамику отдельных имаго и статистически программным путём накапливать информацию о количестве пробегов того или иного рода в колонии для последующей обработки.

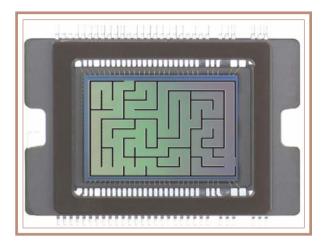
Эти системы могут использоваться как в изолированных условиях, так и встраиваться в камеры и ходы крупных формикариев. Сущность разработки состоит в использовании лабиринтных камер, конфигурация которых зависит от места и целей исследования, закрепляемых на поверхности ПЗС- (прибор с зарядовой связью)

⁵ Barlow M. T. The ant in the labyrinth: random walks and percolation. http://www.pims.math.ca/files/abstract.pdf, http://www.math.ubc.ca/-barlow/talks/crmfields.pdf и http://www.docstoc.com/docs/80473341/The-ant-in-the-labyrinth-random-walks-and-percolation 2011



³ Вместе с тем в работах отечественных учёных происходил обратный процесс - описание взаимодействий в мирмекологических системах с использованием принципов теории информации (Reznikova Z., Ryabko B. Y., 1990, 1994)

 $^{^4}$ Существует проект «Myrmedrome», программное обеспечение которого действует под Windows, MacOS и Linux и может быть скачано по appecy http://www.not-equal.eu/myrmedrome/main_en.html#Download.



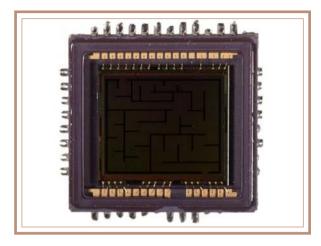


Рис. 2. Матрицы с разными пропорциями кадра удобны для разных конфигураций лабиринта: для длинных пробегов удобны 16:9 или 4:3, а для коротких 3:2 или 4:3.

или КМОП- (комплементарная структура металл – оксид – полупроводник) матриц, фиксирующих трассы (треки пробега) особей с помеченными флуоресцентной краской брюшками.

Длинная экспозиция подобного «мирмекодрома на матрице» в затемнённых ходах и камерах формикария позволяет осуществлять своего рода люминографию, поскольку в темноте флуоресцентные метки на нижней части брюшка оставляют хорошо визуализированные траектории передвижения особи.

Поскольку статистически логично прослеживать достаточно длинные пробеги как наиболее критериальные для идентификации динамики, предлагается использовать наиболее крупные форматы матриц: например, такие, как APS-H, обладающие размерами 28,1х18,7 мм (или 29,2х20 мм в корпусе) при пропорциях фрэйма съёма данных 3:2, или сенсоры 24х36 мм, которые используются в аппаратах типа «Kodak DCS» или же «Contax N Digital». Площади мирмекодромов на платформе APS-H могут составлять до 540 мм², что достаточно для размещения достаточно сложных лабиринтов — то есть проведения весьма дифференцированных экспериментов.

Идея подобного подхода заимствована из технологий «лабораторий на чипе» на КМОП-матрицах [33], часто используемых при флуоресцентной трассировке биологических жидкостей в биохимической микрофлюидике. При этом используются микронные и миллимикронные размеры бороздок, по которым перемещается фиксируемый агент. Изменив размер бороздок до размера соответствующего имаго (что заведомо упростит изготовление соответствующих устройств в лабораторных мастерских) можно экстраполировать этот подход в область энтомологии и этологических иссле-

дований. Поскольку система регистрации при этом, так или иначе, является светочувствительным чипом, установка в целом представляет собой «лабораторию на чипе», адаптированную для решения мирмекологических задач.

Авторы имеют опыт разработки и применения биологических лабораторий на чипе, описанный в недавних статьях [2, 41], в которых, в частности, показано, что возможно построение профилей люминанса стационарного препарата с использованием накопления сигнала лабораторией на чипе на базе бюджетных матриц с элементарными и общедоступными носителями бороздок. При использовании матриц более высокого класса, предлагаемых, в силу необходимости покрытия относительно большой площади при трассировании, к использованию в настоящей работе, можно предложить использование профилей люминанса для трассирования перемещения помеченных муравьёв в лабиринтах и матрицах, установленных в точках пробега в ходах формикария.

При этом в силу наличия фильтров Байера, позволяющих фиксировать флуоресценцию в красном (R), синем (B) и зелёном (G) спектрозональных каналах, можно использовать мечение муравьёв разных каст или групп разными красками и регистрацию сигнала необходимого канала с использованием пикселей, покрытых соответствующим фильтром, а также съём данных по всем трём каналам с дальнейшей сепарацией данных трассирования пробега особей в различных каналах, эквивалентного идентификации принадлежности этих особей к той или иной меченой группе (рис. 3).

Возможен также количественный учёт скорости передвижения и времени нахождения муравья в каждом отрезке его пути по интенсивности засветки в данной области матрицы (анало-

гичное при цейтраферной регистрации можно осуществить и по хронометражу накопления сигнала в записи с привязкой к тайм-коду).

Закрепление лабиринта или иной трассирующей стенки на матрицу осуществляется бесклеевым путём, чтобы не повредить поверхность. Трассирующий элемент пинцетом под углом закрепляется на матрице так, чтобы быть легко сменяемым при изменении целей или методики трассирования в эксперименте. Лучше всего изготавливать лабиринты и т. п. в таком формате, чтобы их стенки упруго упирались в естественные корпусные границы ПЗС или КМОП-чипа, что обеспечит их устойчивость в конструкции мирмекодрома, оставив матрицу пригодной для многоразового использования (рис. 4). Возможен также вариант, при котором для фиксации используются адгезивные

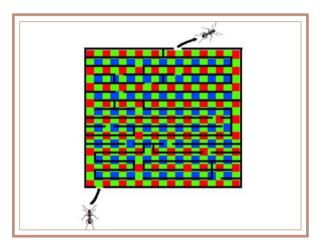


Рис. За. Регистрация принадлежности муравья к меченой касте путём байеровской фильтрации сигнала люминесцентной метки с его брюшка

и электростатические свойства поверхности рёбер лабиринтных накладок.

Обсуждение

Наиболее сложной проблемой потенциальных пользователей в случае использования подобных лабораторий на чипе является корректная визуализация и обработка данных, регистрируемых ими. Необходимо создание программных систем, применение которых будет придавать данным эвристическую ценность, с позиций энтомологической этологии.

Как правило, целью измерений и трассирования является установление траекторий ходок муравьёв, выполняющих специфическую для меченой группы функцию в колонии, или детектирование наличия имаго, принадле-

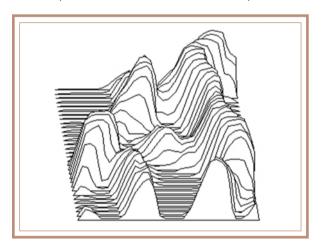


Рис. 3b. Пример статистики накопления сигнала ПЗС для группы муравьёв в несложном лабиринте с боковыми камерами – трёхмерный профиль люминанса (3D Luminance Surface), построенный в программе «Optimas» v. 6.1 (авторские данные)

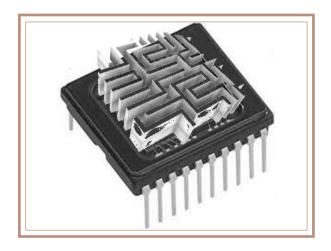




Рис. 4. Накладка лабиринта или трассирующего канала на матрицу должна производиться плавно под углом, чтобы не нарушить поверхность чипа



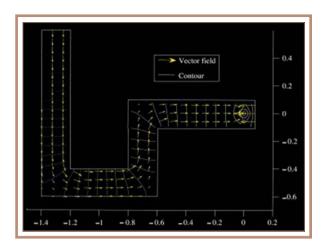


Рис. 5 а. Пример картирования векторными полями перемещений в лабиринтной арене (по Karimpour H. et al., 2012)

жащего той или иной касте, в определённой точке сканируемого развёрткой матрицы пространства и т. п. Соответственно, необходимо на основе данных сканирования лабиринта с передвигающейся в нём особью осуществлять построение векторных полей передвижения имаго (рассматриваемых в приближении частиц, отличающихся только параметрами флуоресценции меток, различных для разных групп или каст), а также производить матричное картирование наличия (отсутствия имаго в точке, которой соответствует некоторая группа пикселей, соответствующая по размерам имаго), подобно счётчику, дающему при наличии маркированного имаго в точке сигнал «1»,

а при отсутствии – «0». Для этого предлагается заимствование двух зарубежных подходов, используемых в других отраслях науки - робототехнике и гидродинамике, сталкивавшихся с подобными проблемами ранее. Для картирования перемещений в лабиринте предлагается использовать векторные поля, и ранее применявшиеся для отслеживания траекторий в лабиринтных структурах в динамике частиц (рис. 5а) [36]. Предлагается использовать в качестве источника информации о векторных полях перемещений видеосигнал, регистрируемый с матриц, после его обработки в ПО, строящем векторные поля компенсации движения [38, 37, 27], используемые при преобразовании чересстрочной развёртки в прогрессивную – деинтерлейсинге. Для этого можно использовать как специализированные средства MATLAB, так и общедоступ-

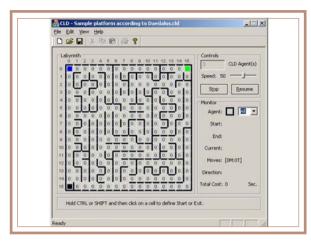


Рис. 5 б. Пример программирования областей нахождения агентов в лабиринте в ПО CLD (из: Elci A., Rahnama B., 2009).

ные средства «VirtualDub» (например, фильтр «Deshaker» или же «VirtualDub MSU Motion Estimation Filter» разработки специалистов Московского государственного университета), обладающие возможностью визуализации векторов движения. Для обеспечения второго требования – подсчёта и установления локализации агентов (имаго) в той или иной точке пространства – предлагается экстраполировать в энтомологию принцип детектирования, используемый в семантической робототехнике. Данный подход базируется на следующей основе: если имеется матрица, каждое из положений которой соответствует возможному положению интеллектуального агента, то при его наличии сигнал программного счётчика выставляет в соответствующей управляющей утилите символ его наличия [24] (рис. 5b).

Подобная алгоритмика может быть применена в описываемом нами случае следующим образом: кодируемая 256-разрядным путём матрица, получаемая при регистрации сигнала ПЗС или КМОП, посредством бинаризации может быть редуцирована до двух значений, кардинально отличимых по динамическому диапазону, светимости объекта. В то время как произвольный светящийся объект, регистрируемый матрицей и заведомо отличающийся по профилю люминанса от фона (в нашем случае это помеченное люминесцирующей краской брюшко муравья), может быть сопоставлен с наличием сигнала, картируемого единицами или светлыми областями, тогда как фон картируется нулями.

Для трассирования «муравьиных путей» векторные поля также используются (см., напр. La Roi M. Landscape transformation by ant trail with the use of a SPM vector field. http://vimeo.com/33440741), но работ подобного рода по лабиринтным траекториям с использованием конкретных видов Formicidae не существует.

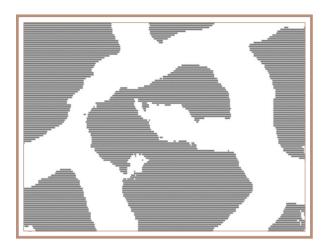


Рис. 6. ASCII-картирование ходов в муравейнике с использованием лабораторий на чипе. По данным прямых фотометрических измерений авторов с использованием бинаризации

На рис. 6 представлено подобное картирование, произведённое нами в лакунах муравьиного гнезда путём непосредственной закладки лаборатории на чипе. Можно видеть, что ходы, а, следовательно, потенциальные статистические траектории перемещения особей имеют камерные ответвления, разветвления и пересечения с различной толщиной, очевидно, соответствующей траффику сквозь эти образова-

ния. Таким образом, вышеописанная система может быть использована и в полевых условиях, не теряя своих возможностей визуализации при подключении к компьютеру.

Возможна также мультипликация её эффективной поверхности счёта при связывании множества отдельных регистрирующих матриц в единый блок считывания, как это имеет место быть в среднеформатных оптических цифровых камерах с целью покрытия широкоформатных искусственных гнездовий, формикариев или мирмекодромов, а также для мониторинга множественных камер муравейников в полевых условиях при трансляции информации с нескольких приборов с зарядовой связью или КМОП и их разводке через квадратер.

Заключение

Таким образом, описанная конструкция регистрирующей системы в формате лаборатории на чипе, оправдывая возложенные на неё функции, является адекватным средством для исследования мирмекологической популяционной динамики в колониях и этологии взаимодействия различным образом маркируемых каст.

Литература

34

- 1. Бианки В. Л., Шейман И. М. Предпочтение направления движения в Т-образном лабиринте у мучного хрущака // Журнал высшей нервной деятельности, 1985, Т. 35, - С. 988-990.
- 2. Градов О. В., Нотченко А. В. Загальнодоступні морфогістохімічні лабораторії на чипі на базі сіток рахункових камер різних типів: мікрофлюїдні морфодинамічні робочі станції // Морфологія, 2012, Т. VI, Вып. 1. – С. 5–19.
- 3. Дашевский Б. А., Карась А. Я., Удалова Г. П. О пластичности поведения муравьёв при обучении в многоальтернативном симметричном лабиринте //Журнал высшей нервной деятельности, 1989, Т. 39, – С. 81–89.
- 4. Карась А. Я., Удалова Г. П. Поведение муравьёв в лабиринте при смене пищевой мотивации на защитную // Журнал высшей нервной деятельности, 2000, Т. 50. - С. 676-685.
- 5. Карась А. Я., Удалова Г. П. Условно рефлекторное переключение лабиринтного навыка у муравьёв Myrmica rubra. // Сб. «Актуальные вопросы функциональной межполушарной асимметрии», НИИ мозга РАМН. – М., 2003, – С. 265–266.
- 6. Карась А. Я., Удалова Г. П., Дашевский Б. А. Пространственно-моторная асимметрия при обучении муравьёв Myrmica rubra в многоальтернативном лабиринте. Деп. ВИНИТИ (6741-В 86) – М., 1986. – 20 с.
- 7. Карась А. Я., Удалова Г. П., Дашевский Б. А. Ориентация муравьёв в лабиринте при поворотах его в горизонтальной плоскости // Сенсорные системы, 1995, Т. 9, Вып. 2-3. - С. 50-57.
- 8. Карась А. Я., Удалова Г. П., Загораева Е. В. Роль мотивации при обучении муравьёв Myrmica rubra в многоальтернативном лабиринте // Вестник ЛГУ, 1986, Сер. 3 (4). - С. 45-52.
- 9. Удалова Г. П., Жуковская М. И., Карась А. Я. Способность муравьёв к множественным переделкам лабиринтного навыка // Журнал высшей нервной деятельности, 1991, Т. 41. - С. 1154-1162.
- 10. Удалова Г. П., Карась А. Я. Асимметрия направления движения у муравьёв Myrmica rubra при обучении в лабиринте // Журнал высшей нервной деятельности, 1985, Т. 35. - С. 377-379.
- 11. Удалова Г. П., Карась А. Я. Асимметрия направления движения у муравьёв Myrmica rubra при обучении в лабиринте в условиях пищевой мотивации. // Журнал высшей нервной деятельности, 1986, Т. 36. - С. 707-714.
- 12. Удалова Г. П., Карась А. Я. Индивидуальные особенности модификации лабиринтного навыка при изменении вида и уровня мотивации у муравьёв Myrmica rubra // Успехи современной биологии, 1999, Т. 119, Вып. 3. – С. 233–242.
- 13. Удалова Г. П.. Жуковская М. И., Карась А. Я. Пространственно-моторная асимметрия у муравьёв при множественных переделках лабиринтного навыка // Вестник СПбГУ, 1992, Сер. 3 (1). – С. 67–75.

Градов О. В., Нотченко А. В., Линь В.- Дж.



- 14. Халифман И. А. Операция «Лесные муравьи». М.: Лесная промышленность, 1974. 232 с.
- 15. Alderton D. Firefly Encyclopedia of the Vivarium: Keeping Amphibians, Reptiles, and Insects, Spiders and other Invertebrates in Terraria, Aguaterraria, and Aguaria. - N.Y.: Firefly Books, 2007. - 244 c.
- 16. Bader K. S. Insect trace fossils on dinosaur bones from the Upper Jurassic Morrison Formation, northeastern Wyoming, and their use in vertebrate taphonomy. - Ann Arbor (Michigan), UMI. - 132 c.
- 17. Bolognesi T. Planar Trivalent Network Computation // Lecture Notes in Computer Science, 2007, No. 4664. P. 146–157.
- 18. Boon J. P. How Fast Does Langton's Ant Move? // Journal of Statistical Physics, 2001, Vol. 102, Iss. 1-2. C. 355-360.
- 19. Brady A. H. The Busy Beaver Game and the Meaning of Life. The Universal Turing Machine: A Half-Century Survey (Ed. by R. Herken) // Wien, N.Y.: Springer-Verlag, 1995. - C. 237-254.
- 20. Buatois L. A., Mangano M. G. Ichnology: Organism-Substrate Interactions in Space and Time. Cambridge, N.Y.: Cambridge University Press, 2011. - 370 c.
- 21. Dashevskii B. A., Karas A. Y., Udalova G. P. (1990) Behavioral plasticity of Myrmica rubra ants during learning in a multi-alternative symmetrical labyrinth // Neuroscience and Behavioral Physiology, 1990, Vol. 20, Issue 1. - P. 18-26.
- 22. Dewdney A. K. Two-dimensional Turing machines and Turmites make tracks on a plane» // Scientific American, 1989, Sept. P. 180–183.
- 23. Dorigo M., Stutzle T. Ant colony optimization. Cambridge: Bradford Book (MIT Press), 2004. 319 P.
- 24. Elci A., Rahnama B. Towards Semantically Intelligent Robots. Advances in Human-Robot Interaction (Ed. by V.A. Kulyukin), Shanghai: INTECH, 2009 - P. 13-38.
- 25. Engelbrecht A. P. Fundamentals of Computational Swarm Intelligence. N.Y.: Wiley, 2005. 672 p.
- 26. Ernst M. H. Lorentz models revisited what one can learn from ants in a labyrinth. Lecture Notes in Physics, 1986, No. 253. C. 175–216.
- 27. Flierl M., Girod B. Video Coding with Superimposed Motion-Compensated Signals: Applications to H.264 and Beyond. Boston, Dordrecht, London: Kluwer Academic Publisher (Springer Imprint), 2004. - 174 p.
- 27. Gajardo A. Dependence of the Behavior of the Dynamical System Langton's Ant on the Network Topology (Ph.D. Diss). Lyon: École Normale Supérieure de Lyon, 2001. - 50 p.
- 28. Gajardo A., Goles A., Moreira A. Generalized Langton's Ant: Dynamical Behavior and Complexity // Lecture Notes in Computer Science, No. 2010 (STACS 2001), 2001. - P. 259-270.
- 29. Gajardo A., Moreira A., Goles E. Complexity of Langton's ant // Discrete Applied Mathematics, 2002, Vol. 117, Iss. 1–3. P. 41–50.
- 30. Gale D., Propp J. Further Ant-ics //Mathemetical Intelligencer, 1994, Vol.16. P. 37-42.
- 31. Gale D., Propp J., Sutherland S., Troubetzkoy S. Further Travels with my Ant. Preprint IMS 95-1 arXiv:math/9501233v1 (Institute for Mathematical Sciences), 1995. - 14 p.
- 32. Gale D., Propp J., Sutherland S., Troubetzkoy S. Further Travels with my Ant. Mathematical Intelligencer, 1995, Vol. 17. P. 48–56.
- 33. Ghafar-Zadeh E., Sawan M. CMOS Capacitive Sensors for Lab-on-Chip Applications: A Multidisciplinary Approach Heidelberg, London, New York: Springer, 2010. -156 p.
- 34. Hölldobler B., Wilson E. O. The Superorganism: The Beauty, Elegance, and Strangeness of Insect Societies, N. Y.: W. W. Norton & Company, 2008, - 544 p.
- 35. Janet C. Recherches sur l'anatomie de la fourmi et essai sur la constitution morphologique de la tête de l'insecte (Thèse de la Faculté). Paris, 1900. - 203 p.
- 36. Karimpour H., Keshmiri M., Mahzoon M. Stabilization of an autonomous rolling sphere navigating in a labyrinth arena: A geometric mechanics perspective // Systems & Control Letters, 2012, Vol. 61, Issue 4. - P. 495-505.
- 37. Karczewicz M., Nieweglowski J., Haavisto P. Video coding using motion compensation with polynomial motion vector fields // Signal Processing: Image Communication, 1997, Vol. 10, Iss. 1-3. – P. 63–91.
- 38. Konrad J., Dubois E. Bayesian Estimation of Motion Vector Fields // IEEE Transactions on Pettern Analysis and Machine Intelligence, 1992, Vol. 14. Issue 9. - P. 910-927.
- 39. Langton C. G. Studying artificial life with cellular automata // Physica D: Nonlinear Phenomena, 1986, Vol. 22, Iss. 1–3. P. 120–149.
- 39. Moreira A., Gajardo A., Goles E. Dynamical Behavior and Complexity of Langton's Ant // Complexity, 2001, Vol. 6, Issue 4. P. 46–51.
- 40. Nider J. Formicarium Ioannis Nyder S. Theologiae Doctoris, et Ecclesiastae Praestantissimi, Ex Officina Baltazaris Belleri, 1602. 431 p.
- 41. Notchenko A. V., Gradov O. V. Elementary Morphometric Labs-on-a-Chip Based on Hemocytometric Chambers With Radiofrequency Culture Identification and Relay of Spectrozonal Histochemical Monitoring // Visualization, Image Processing and Computation in Biomedicine, DOI: 10.1615/VisualizImageProcComputatBiomed.2013005968, 2013.
- 42. Reznikova Z., Ryabko B. Y. Information Theory approach to communication in ants. Sensory systems and communication in Arthropods, Basel., Birkhauser Verlag, 1990. - P. 305-307.
- 43. Reznikova Z. I., Ryabko B. Y. Experimental study of the ants' communication system with the application of the Information Theory approach // Memorabilia Zoologica, 1994, Vol. 48. – P. 219–236.
- 44. Reznikova Z. I., Ryabko B. Y. An experimental study of ants' language and cognitive aptitude based on ideas of the Information Theory // Siberian Journal of Ecology, 1994, Vol. 4. - P. 347-359.
- 45. Richardson T. O., Christensen K., Franks N. R., Jensen H. J., Sendova-Franks A. B. Ants in a Labyrinth: A Statistical Mechanics Approach to the Division of Labour // PLoS ONE, 2011, Vol. 6, Issue 4, Art. e18416. - 12 p.





- 46. Scudder S. H. On The First Discovered Traces Of Fossil Insects In The American Tertiaries. Charleston (South Carolina): NABU Press, 2012. 28 p.
- 47. Seilacher A. Trace Fossil Analysis. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007. 240 p.
- 48. Solon C. Ant Colony Optimization and Constraint Programming. Hoboken, New Jersey: Wiley-ISTE, 2010. 320 p.
- 49. Stewart I. The Ultimate in Anty-Particles // Scientific American, 1994, 271. P. 104–107.
- 50. Stewart P. J. Charles Janet: unrecognized genius of the periodic system // Foundation of Chemistry, 2010, Vol. 12, No.1. P. 5–15.
- 51. Straley J. P. The ant in the labyrinth: diffusion in random networks near the percolation threshold // Journal of Physics C: Solid State Physics, 1980, Vol. 13, Issue 16. P. 2991–3003.
- 52. Tschinkel W. R. The nest architecture of the Florida harvester ant, Pogonomyrmex badius. // Journal of Insect Science, 2004, Vol. 4, Issue 21. P. 1–19.
- 53. White W. F. Ants and their ways: with illustrations, and an appendix giving a complete list of genera and species of the British ants. London: RTS, 1895. 255 p.
- 54. Yan Z., Yuan C.-W. Ant Colony Optimization for Navigating Complex Labyrinths // Lecture Notes in Computer Science, 2003, No. 2639. P. 445–448.



ЭНТОМОЛОГИЯ. ТЕРМИНОЛОГИЧЕСКИЙ СЛОВАРЬ

Арренотокия (от др.-греч. arrhen — «мужской») + греч. «tokos» — потомство) — способ девственного размножения насекомых, при котором из неоплодотворённых яиц путём партеногенеза развиваются исключительно самцы.

Вертлуг (*trochanter*) — один из члеников ног насекомых, помещающийся между тазиком (со-ха) и бедром (*femur*).

Виски (tempora) — один из участков головы.

Гемиметаморфоз (лат. hemimetamorphosis), или неполное превращение — это развитие с прохождением лишь трех стадий — яйца, личинки и имаго.

Гиперметаморфоз, или избыточное полное превращение (лат. hypermetamorphosis), — усложнение полного превращения, характерной особенностью которого является наличие нескольких форм личинок (в том числе триунгулин).

Гнездовой паразитизм — тип клептопаразитизма, которым пользуются некоторые насекомые (а также птицы, рыбы), заключающийся в манипуляции и использовании другого животного-хозяина, или того же вида (внутривидовой гнездовой паразитизм), или другого (межвидовой) для выращивания потомства животногопаразита (кукушки, шмели-кукушки *Psithyrus*).

Голометаморфоз (лат. holometamorphosis), или полное превращение, характеризуется прохождением от четырёх до пяти стадий — яйца, личинки, куколки, имаго и иногда предкуколки.

Имаго (лат. *imago* — «образ») — взрослая (дефинитивная) стадия индивидуального развития насекомых и некоторых других членистоногих животных со сложным жизненным циклом.

Кератофаги — насекомые и другие животные питающиеся преимущественно, или исключительно, кератинами волосяного покрова и роговых образований млекопитающих, а также перьев птиц (кожееды, моль).

Клипеус (лат. *clypeus*), или наличник — передняя верхняя часть головы насекомых и пауков.

Кокон (от фр. *cocon* — «кокон») — оболочка из шёлка, которой окружают себя гусеницы бабочек, личинки некоторых насекомых и пауки, переходя в стадию куколки.

Крыска — личинка некоторых мух-журчалок (*Diptera: Syrphidae*).

Куколка — промежуточная стадия развития насекомых, между личинкой и имаго, для которых характерно полное превращение (метаморфоз) в течение жизни.

http://ru.wikipedia.org