

Способности муравьев к сложению и вычитанию небольших чисел

Б. Я. Рябко, Ж. И. Резникова

Борис Яковлевич Рябко, доктор технических наук, член-корреспондент Российской инженерной академии, заведующий кафедрой прикладной математики и кибернетики Сибирской государственной академии телекоммуникаций и информатики. Руководитель проекта JFM100.

Жанна Ильинична Резникова, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник Института систематики и экологии животных Сибирского отделения РАН.

Вопрос о способностях животных к интеллектуальной и психической деятельности занимал исследователей в течение многих столетий. Еще Аристотель указывал на значительное сходство между человеком и животными, приписывая последним разные степени развития души. Эпоха Возрождения обошлась с животными весьма строго, что отразилось во взглядах Декарта на животных как на точные механизмы, однако похоже, что в человеческих умах сохранялось представление о способностях социальных животных к «мышлению» и продуктивному общению. В «Божественной комедии» Данте (перевод М. Лозинского) мы читаем:

Так муравьи, столкнувшись где-нибудь,
Потрутся рыльцами, чтобы дознаться,
Быть может, про добычу иль про путь,
Но только миг объятья дружбы длится...

Дарвин считал, что в развитии психических способностей животных и человека существует эволюционная непрерывность, и, по сути, положил начало новой волне исследований интеллектуальных возможностей животных.

Многие современные исследователи весьма интенсивно изучают когнитивные (познавательные) способности животных — прежде всего благодаря важности этого вопроса для биологии, психологии, лингвистики и таких прикладных областей, как кибернетика, робототехника и др., но также просто потому, что это очень интересно, а этот мотив — далеко не последний в науке.

К настоящему времени у некоторых высших позвоночных животных, а также медоносных пчел и общественных ос обнаружены способности

к абстрагированию, оперированию пространственно-геометрическими признаками предметов [1, 2]. Продемонстрирована способность к счету у попугая серого жако [3] и врановых птиц [4], а также возможности шимпанзе использовать не только простейшие арифметические операции, но и такие визуальные символы, как буквы и цифры [5]. При этом разработано много очень изящных методов. Например, А. и Б. Гарднеры успешно обучили молодых шимпанзе началам символического жестового языка, используемого глухонемыми [6]. И. Пепперберг сумела обучить говорящего попугая серого жако отвечать на сложные вопросы, касающиеся количества и разных свойств предметов, после того как использовала в качестве дополнительного партнера человека, играющего роль второго попугая. Д. Повинелли и его коллеги с помощью игры, похожей на настольный хоккей, показали, что только приматы (но не низшие обезьяны) могут представить себя в роли партнера и соответственно изменять свои действия [7].

Существенный вклад в это направление внесли отечественные ученые. Так, Н. Н. Ладыгина-Котс провела сравнительные психологические исследования, сопоставляя развитие шимпанзе и ребенка [8]. Л. В. Крушинский и его последователи разработали схемы экспериментов, позволивших доказать, что животные многих видов способны использовать эмпирические правила; в частности, они могут предсказывать траекторию движения объектов (эта способность называется экстраполированием) [9].

Очень большое внимание исследователей привлекают системы коммуникации высокосоциальных животных — таких как приматы, дельфины, муравьи, термиты, пчелы. Стало известно, что приматы и дельфины довольно легко овладевают символическими языками-посредниками, разработанными экспериментаторами. Однако расшифровать естественный язык животных удалось только у медоносных пчел. Это было осуществлено в замечательных опытах К.Фриша [10]. Доказать существование подобного символического естественного языка у других животных, даже таких умных, как приматы и дельфины, пока никому не удалось. Нам кажется, что основная причина этих неудач — методологическая. Большинство зоологов, изучавших коммуникацию животных, явно или неявно подражали лингвистам, пытаясь составить нечто вроде англо-обезьяньего словаря или, скажем, русско-дельфиньего, но эти попытки оказались безуспешными. Ясно, что, прежде чем заняться прямой расшифровкой языка, необходимо проникнуть во внутренний мир его носителей, понять, о чем они «говорят». Представим, что мы наблюдаем действия японцев во время чайной церемонии и пытаемся по произносимым словам и совершаемым действиям составить японско-русский словарь. При этом наблюдатель не понимает смысла большинства действий, не знает, где начинаются и кончаются слоги и фразы; одно и то же слово, произносимое разными лицами, можно воспринимать как разные слова и, наоборот, несколько слов принимать за одно. По-видимому, из таких наблюдений составить словарь невозможно.

Не менее сложные методологические проблемы возникают и при изучении интеллектуальных способностей животных, в частности, связанных с их умением считать.

В середине 80-х годов мы предложили принципиально новый подход к изучению систем коммуникации и интеллекта животных, основанный не на попытках прямой расшифровки их языка, а на использовании идей теории информации. Благодаря такому подходу к исследованию интеллектуальных способностей муравьев было экспериментально доказано,

что муравьи обладают развитым «языком», выяснено, что они способны запоминать и передавать сведения о координатах объекта и считать в пределах нескольких десятков [11, 12].

В последние годы нами была разработана и проведена серия экспериментов, позволивших исследовать способность муравьев к сложению и вычитанию. Идея этих экспериментов основана на том, что у муравьев формируется «система счисления», напоминающая использование римских цифр.

Для исследований были выбраны муравьи вида *Formica polyctena*, которых отличает высокий уровень социальной организации. Именно эти муравьи строят знакомые всем и хорошо заметные в лесу муравейники из хвои и веточек.

Лабораторная семья численностью около 2 тыс. особей помещалась на арену площадью 2 м², в прозрачном гнезде, позволявшем фиксировать контакты между ними. Все муравьи, участвовавшие в опыте, были помечены индивидуальными метками — цветными точками нитрокраски, нанесенными на разные части тела. Муравьи получали пищу раз в три дня и только на экспериментальной установке (рис. 1). Она имела вид

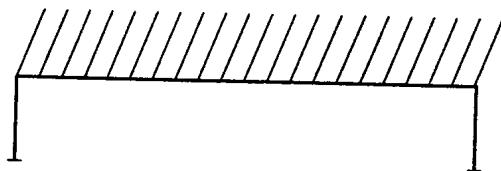


Рис. 1. Схематическое изображение экспериментальной установки

горизонтально расположенного «ствола» с 40 «ветками» длиной по 10 см. На каждой из веток находилась кормушка, но только одна из них содержала сироп, а остальные — воду. В начальную точку ствола муравьи попадали по мостику. Для получения пищи муравьям необходимо было передавать сведения о номере ветки с кормушкой.

В более ранних наших опытах, популярное изложение которых было опубликовано в журнале «Природа» [11], мы выяснили, что у муравьев исследуемого вида при необходимости группового решения сложных задач фуражировочная деятельность организована следующим образом: действуют постоянные по составу группы из 4–8 особей, в каждой из которых поиском пищи занят один разведчик. Обнаружив пищу, он сообщает о ней только своей группе фуражиров.

Во всех этих экспериментах мы специально подсаживали разведчика на ветку с пищей. Затем он возвращался в гнездо самостоятельно и начинал контактировать с членами своей группы, после чего группа выходила из гнезда и направлялась к установке. При этом мы временно изолировали разведчика, удаляя его с арены. Это заставляло группу фуражиров находить кормушку самостоятельно, основываясь только на сведениях, полученных от разведчика. В подавляющем большинстве случаев группа фуражиров сразу приходила на ветку с кормушкой, не совершая ошибочных просмотров соседних веток. Во всех случаях мы фиксировали время контакта (в секундах) разведчика с фуражирами в гнезде. Началом контакта считалось прикосновение к первому муравью, окончанием — выход из гнезда первых двух фуражиров.

Чтобы исключить гипотетически возможное использование пахучего следа, а также запаха самого сахарного сиропа, установка заменялась на

тождественную в то время, когда разведчик находился в гнезде и контактировал с фуражерами. При этом на замененной установке все кормушки были без сиропа. Если группа сразу совершала правильный выбор, на ветку быстро помещалась кормушка с сиропом, т. е. муравьи сразу получали вознаграждение за правильно переданную и усвоенную информацию. Если часть муравьев (более одного) совершала ошибку, выбор группы в целом считался ошибочным. Опыт с данной группой в этот день заканчивался. В ходе эксперимента кормушка помещалась на разные ветки — от первой до тридцатой. Пока длился сеанс с одной группой, фуражиры и разведчики из остальных групп на установку не допускались (с помощью перегородки, ограничивающей рабочую часть арены).

К каким же заключениям нам удалось прийти в результате этих экспериментов?

Способность муравьев к оценке числа объектов и передаче этой информации

В серии опытов, которые проводились в 1984–1987 гг. и в 1992 г., участвовало в общей сложности 32 группы фуражиров, 152 раза группы фуражиров выходили из гнезда после контакта с разведчиком и направлялись к кормушкам, при этом в 117 случаях группа фуражиров сразу приходила к нужной ветке, не совершая ошибочных заходов к пустым кормушкам. В остальных случаях муравьи приходили к пустым кормушкам и начинали искать пищу путем перебора соседних веток. В тех опытах, когда фуражиры не находили кормушку (всего 35), работали, как установлено, одни и те же «неспособные» разведчики; их мы выявляли и в дальнейшем не допускали на рабочую часть арены.

Полученные результаты говорят о том, что разведчик передает фуражерам информацию о номере ветки. Мы доказали это, используя обычные, принятые в статистике методы [13], а также проводя специальные контрольные опыты. При этом оказалось, что зависимость времени t (в секундах) передачи информации о местонахождении пищи от номера ветки j представляет собой (с достаточно хорошей точностью) прямую пропорциональность: $t = aj$, где $a \approx 7$. Более точно эта связь величин описана в указанной выше работе. Получалось, что время «произнесения» муравьями числа 20 примерно в 2 раза дольше, чем числа 10, и в 10 раз дольше, чем числа 2.

В современных языках человека ситуация совсем иная. Длина записи целого положительного числа j в десятичной системе счисления примерно равна $\lg j$, а точнее $\lceil \lg(j+1) \rceil$ цифр, где скобки $\lceil \rceil$ означают округление до большего целого, например $\lceil 3.1 \rceil = \lceil 3.7 \rceil = 4$. Но люди не всегда применяли десятичную систему счисления. Известно, что в некоторых архаичных языках использовалось представление чисел, при котором длина записи (и произнесения) числа была пропорциональна его длине, как у муравьев! Так, числу 1 соответствовало слово «палец», числу 2 — «палец, палец», числу 3 — «палец, палец, палец» и т. д., а десятичная система счисления появилась в результате длительного и сложного развития. Однако это еще не говорит о примитивности муравьиного «языка». Дело в том, что в «оптимальном» языке длина слова должна быть согласована с частотой его использования. Именно на использовании этого свойства основана схема наших последних экспериментов.

Пластичность «языка» муравьев и их способность к арифметическим операциям

В своих экспериментах мы исходили из того теоретико-информационного факта, что в «оптимальных» системах коммуникации время передачи сообщения t и частота его встречаемости P связаны соотношением $t = -\lg P$ (в качестве сообщения можно рассматривать букву, слово, фразу и т. п.). Эта связь отражает, в частности, тот факт, что в естественных языках человека при возрастании частоты какого-либо сообщения длина кодирующего его слова уменьшается (например, даже в официальных докумен-

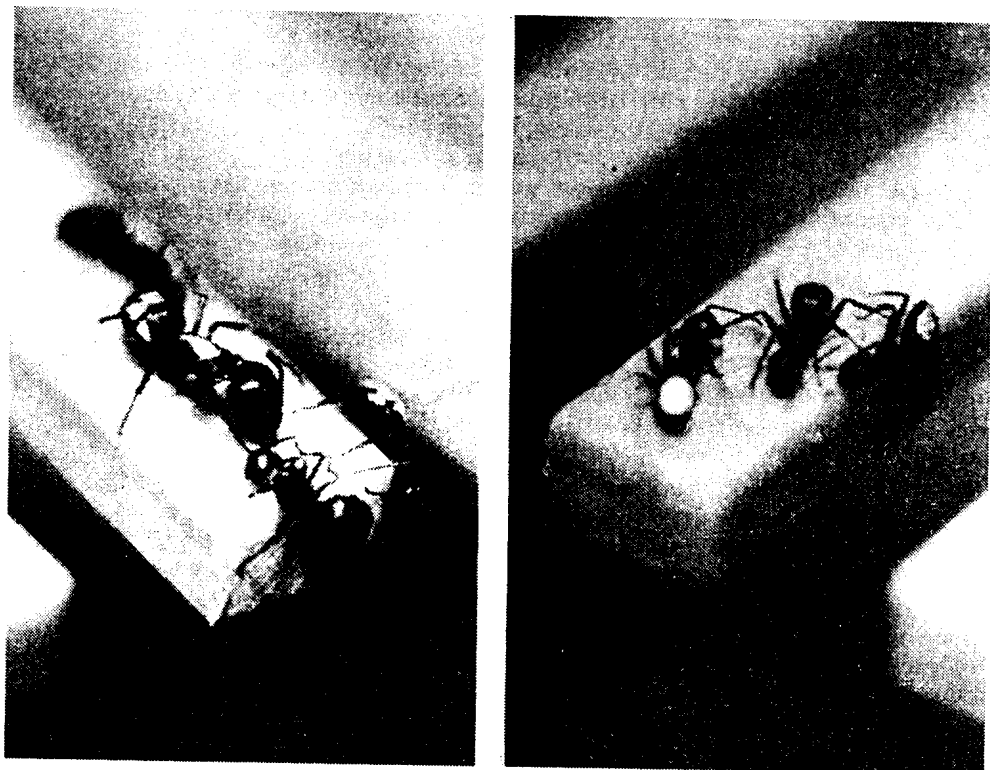


Рис. 2. Справа — группа муравьев-фуражиров *F. polystena* на «ветке», где должна находиться кормушка; по условиям этого эксперимента они приходят на пустую «ветку», поэтому на снимке муравьи находятся в «недоумении», ощупывают пустую «ветку» и кормят друг друга пищей из зобиков (это обычная реакция). Слева — группа муравьев *Camponotus saxatilis*, участвующих в сходных экспериментах

тах вместо «Правительство Российской Федерации» часто используют слово «Кремль», а вместо «Правительство Соединенных Штатов» — «Белый дом» и т. п.). Этой же цели в значительной степени служат слова профессиональных жаргонов, аббревиатуры, местоимения и т. п.

На такой же установке, что и в предыдущих опытах, специально создавалась ситуация, когда частота использования одних чисел была существенно больше, чем других. В первой части эксперимента номер ветки

с кормушкой, предлагаемой муравьям в очередном опыте, выбирался с помощью таблицы случайных чисел в пределах 30. Оказалось, что время передачи сообщения «кормушка на ветке j » в этой части эксперимента было примерно пропорционально j , как и в аналогичных опытах, описанных выше. Во второй части эксперимента мы качественно изменили задачу: муравьям предлагалось передавать два сообщения — «кормушка на ветке 10» и «кормушка на ветке 20» — значительно чаще, чем остальные. Для этого на ветках 10 и 20 кормушка устанавливалась с большой вероятностью $P = 1/3$, а на остальных 28 ветках — с малой вероятностью $P' = 1/84$.

После серии опытов (нескольких десятков повторений) муравьи существенно сократили время передачи сообщений «кормушка на ветке 10» и «кормушка на ветке 20» по сравнению с первой частью эксперимента, когда кормушки устанавливались на любой из 30 веток с равной вероятностью, т. е. изменили характер коммуникации, уменьшив продолжительность двух часто встречающихся сообщений. Это, по-видимому, свидетельствует о достаточно высокой пластичности «языка» муравьев.

Идея третьего этапа эксперимента, позволившего показать, что муравьи способны прибавлять и вычитать небольшие числа (в пределах 5), основана на трансформации используемой ими «системы счисления». Дело в том, что в присутствии современных языкам представлению чисел требуются некоторые арифметические операции. Особенно отчетливо это видно при использовании римских цифр. Например: $VI = V + I$; $IX = X - I$ и т. д. В эксперименте мы сознательно вырабатывали у муравьев систему счисления, напоминающую «римский» способ представления чисел. Номер ветки с приманкой опять выбирался с равной вероятностью в диапазоне от 1 до 30, т. е. так же, как на первом этапе. Оказалось, что зависимость времени передачи сведений о том, что кормушка находится на ветке с номером j , на третьем этапе совсем иная, чем на первом: время передачи информации о номере ветки было в среднем тем меньше, чем ближе ветка находилась к одной из «особых» (10 или 20) или к началу установки. Например, на передачу сообщения о том, что кормушка находится на ветке 11, муравьи затрачивали на первом этапе 70–82 с, а на передачу сообщения о ветке 1 — лишь 8–12 с. На третьем этапе на передачу сообщения о ветке 11 затрачивалось всего 5–15 с (вспомните римские цифры: одиннадцать равно $X + I$).

Анализ времени передачи сообщений муравьями позволяет предположить, что на третьем этапе эксперимента сообщения разведчика состояли из двух частей: информация о том, к какой из особых веток ближе находится ветка с кормушкой, и затем — расстояние от особой ветки до ветки с кормушкой. Иными словами, муравьи, видимо, передавали «имя» особой ветки, ближайшей к кормушке, а потом — число, которое надо прибавить или отнять для нахождения ветки с кормушкой.

Этот вывод был подтвержден статистически [14]. Аналогичные опыты проводились по той же схеме, но с особыми ветками под номерами 7, 14 — в 1992 г. и 10, 19 — в 1994 г. Результаты во всех случаях были похожими.

Таким образом, эксперименты показывают, что, во-первых, «язык» муравьев достаточно пластичен и отнюдь не примитивен, и, во-вторых, муравьи могут складывать и вычитать небольшие числа (одно из слагаемых и вычитаемые в наших опытах изменялись от 1 до 5).

ЛИТЕРАТУРА

1. Harlow H. F. The formation of learning sets //Psychol. Rev. 1949. V. 56. P. 51-65.
2. Мазохин-Поршняков Г. А. Обучаемость насекомых и их способность к обобщению зрительных символов //Энтомол. обозрение. 1968. Т. 47. С. 362-379.
3. Pepperberg I. M. Acquisition of the same-different concept by an African Grey Parrot (*Psittacus eritacus*): Learning with respect to categories of colour, shape and material //Animal Learn. and Behaviour. 1987. V. 15. P. 423.
4. Зорина З. А., Смирнова А. А. Количественные оценки у серых ворон: обобщение по относительному признаку «большее множество» //Журн. высш. нерв. деятельности. 1995. Т. 45, Вып. 3. С. 490-499.
5. Matsuzawa T. Isomorphism of symbol — use and tool — use in chimpanzees in captivity and in the wild //Proc. 23th Int. Ethological Conference. Torremolinos, Spain. 1993. P. 11.
6. Gardner B. T., Gardner R. A. Two-way communication with an infant chimpanzee //Behaviour of Non-Human Primates. N.Y.: Academic Press. 1971. V. 4, Ch. 3. P. 738-750.
7. Povinelly D. J., Nelson K. E., Boysen S. T. Comprehension of role reversal in chimpanzees: evidence of empathy? //Animal Behaviour. 1992. V. 43, № 4. P. 633-641.
8. Ладыгина-Котс Н. Н. Дитя шимпанзе и дитя человека в их инстинктах, эмоциях, играх, привычках и выразительных движениях. Юбил. изд. Гос. Дарвиновского музея. М., 1935.
9. Крушинский Л. В. Биологические основы рассудочной деятельности. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1977.
10. Frish K. von. Tanzsprache und Orientierung der Bienen. Berlin—Heidelberg—N.Y., 1965.
11. Резникова Ж. И., Рябко Б. Я. Язык муравьев и теория информации //Природа. 1988. № 6. С. 65-71.
12. Резникова Ж. И., Рябко Б. Я. Теоретико-информационный анализ «языка» муравьев //Журн. общ. биологии. 1990. Т. 51, № 5. С. 601-609.
13. Резникова Ж. И., Рябко Б. Я. Передача информации о количественных характеристиках объекта у муравьев //Журн. высш. нерв. деятельности. 1995. Т. 45, Вып. 3. С. 500-509.
14. Резникова Ж. И., Рябко Б. Я. Использование идей и методов теории информации для исследования пластичности языка муравьев и их способности к суммированию и вычитанию небольших чисел //Пробл. передачи информ. 1995. Т. 31, Вып. 4. С. 100-108.