

Резникова Ж. И. 2004. Экспериментальные исследования способностей животных к количественным оценкам предметного мира // Модернизм в психологии. Сборник материалов Всероссийской конференции. Изд-во НГУ, с. 113 – 136.

*Четыре ноги хорошо, две ноги – плохо.*  
Дж. Оруэлл «Скотный двор»

### **Постановка проблемы**

Способность к счету является, несомненно, одной из высших психических функций живых организмов. Вопрос о том, в чем заключается понятие «истинного счета» и действительно ли некоторые животные умеют считать, до сих пор является дискуссионным. Очевидно, что во многих случаях способности животных остаются скрытыми от наблюдателя до тех пор, пока не будут найдены адекватные методики. К настоящему времени как животными, так и экспериментаторами достигнуты определенные успехи, и наши знания в этой области продолжают пополняться.

Пожалуй, ни одна область когнитивной этологии не опирается в такой же степени на непосредственное сравнение способностей животных и человека как исследование компетентности в количественных оценках. Между тем, адекватный «язык» для сравнительного анализа в этой области науки еще не разработан. Все критерии для сравнения взяты из области психологии, в частности, возрастной психологии. Действительно, без знания о закономерностях развития способностей к суждению о пропорциях и количестве у маленьких детей трудно понять и представить себе как эти способности функционируют у человека, а тем более у других биологических видов. В то же время развитие представлений и понятий о числе у человека связано с языковым развитием и, таким образом, обладает высокой специфичностью.

Из опытов Ж. Пиаже и его последователей известно, что соответствующие способности развиваются у детей весьма медленно. Двухлетние малыши, научившись говорить, нередко удивляют родителей, «пересчитывая» ступеньки, когда поднимаются по лестнице. Однако гордиться их математическими способностями еще рано, так как дети просто повторяют механически заученный ряд, соотнося его с моторными действиями. Им еще непонятно, что, сделав шаг, а за ним еще один, они прибавили к ряду две ступеньки. Если ребенок моложе четырех лет, переливая воду из высокого и узкого сосуда в широкий и низкий, повторяет вслед за взрослым, что воды осталось столько же, сколько и было, то на вопрос, заданный несколько минут спустя, он уверенно ответит, что воды больше в узком и длинном стакане. Человек в этом возрасте уже опирается на опыт, позволяющий ему судить о количестве воды по ее уровню в сосуде, но не обладает представлениями об «истинном количестве». Точно так же, приведя в соответствие два ряда, скажем, светлых и темных пуговиц – одна против другой – ребенок ответит, что их поровну, но если в одном ряду промежутки между пуговицами увеличить, то он скажет, что пуговиц больше в том ряду, который выглядит длиннее. Сходные опыты психологи, работающие с детьми, проделывали с разными предметами и веществами. Например, если взять два одинаковых пластилиновых шарика и один вытянуть в колбаску, то, по мнению ребенка, пластилина во втором предмете «станет» больше. Понятия об истинных пропорциях и количествах формируются по мере созревания соответствующих нервных структур в мозгу человека, а суждения, например, о соотношении скоростей становятся доступными ребенку лишь в возрасте 10–11 лет. В это время в его школьных учебниках и появляются задачи о сближающихся поездах и наполняющихся бассейнах.

Выявить и адекватно описать представления животных о количественных соотношениях предметов нелегко, так как у человека, в отличие от других биологических видов, они

опираются на речь и приобретенные знания, и это трудно сопоставить с невербальными представлениями о числах и о количествах у других видов. Для нас точки, расположенные по углам воображаемого треугольника, соответствуют числу «три», так как мы знаем, что данная фигура имеет три угла. Для голубя это может соответствовать «количеству», которое можно склевать быстро и без помех. Вербальное обозначение числа – скажем, «пять» – для человека может соответствовать и кучке из пяти апельсинов (крупных предметов) и линии из пяти крупинок (мелких предметов), и пяти свисткам, и пяти стукам в дверь (условным сигналам). Вполне вероятно, что представители других биологических видов могут судить о количестве как предметов, так и звуков (а возможно, и запахов). Но для того, чтобы выявить эти способности, необходимо специально исследовать вопрос о возможности кроссmodalного переноса.

Современные методы изучения количественных оценок у животных опираются на критерии, предложенные Гельманом и Галлистом для исследования детей (Gelman, Gallistel, 1978) и впоследствии несколько адаптированные для применения к животным (Davis, Perusse, 1988). Выделяют несколько типов «нумерической компетенции» (numerical competence). (1) Способность различать множества по числу элементов (numerosity discrimination) соответствует суждению «больше – меньше» и не требует знаний об абсолютном числе элементов; (2) оценка (estimation) – это способность «прикинуть» число элементов во множестве (например, в стае «около 50 уток»); (3) счет (counting) – способность определить абсолютное число элементов путем их пересчета.

Процесс счета характеризуется также и принципами абстракции (могут быть пересчитаны любые предметы, скажем, птицы в стае или окна в здании) и независимости от порядка пересчета (так, если мы хотим пересчитать число цветов на ветке, на имеет значения, с какого цветка начать).

История объективных исследований нумерической компетенции у животных восходит к началу 20-го столетия. У истоков этой области лежит несколько ранних экспериментов, и один из них является поучительным анекдотом, на который более столетия ссылаются во многих учебниках, статьях и докладах как на пример, говорящий о необходимости строгого контроля в экспериментах. Речь идет об орловском рысаке по кличке Умный Ганс, которого его хозяин, барон фон Остен, демонстрировал как способного не только различать написанные на доске цифры, но и осуществлять арифметические операции и даже извлекать корни (см. статью Анастасии Рыбенко в нашей библиотеке). Ганс обозначал результаты соответствующим числом ударов копыта. Для обсуждения и ревизии этих достижений была собрана комиссия психологов и зоопсихологов. Фон Остен совсем не собирался вводить экспертов в заблуждение, он искренне верил в исключительные умственные способности лошадей, среди которых Ганс был самым способным, но не единственным его учеником. Далеко не сразу удалось установить, что конь реагирует на неуловимые для людей изменения в поведении хозяина. Поэтому он отвечал только на те вопросы, на которые фон Остен сам знал ответ. Итак, лошади не умеют извлекать корни. Каковы же пределы нумерической компетенции животных? В данном обзоре проанализированы результаты исследований экспериментаторов, работавших с самыми разными существами, от двуногих до шестиногих.

### **Две ноги**

*... Правда, с протестом выступили птицы, поскольку им показалось, что и у них лишь две ноги.*

Дж. Оруэлл «Скотный двор»

Значительная часть исследований, посвященных изучению способности животных к счету, была проведена на птицах. Первая детальная работа принадлежит Отто Келеру (Koehler, 1941, 1960).

Он настолько подробно изучил поведенческие реакции птиц на количественные параметры внешних раздражителей, что работы, посвященные этому вопросу – не только на птицах, но и на других животных – стали делить на до- и после-келлеровские (Emmert, 2001). Келлер пришел к выводу, что у птиц есть способность количественно сравнивать группы одновременно предъявляемых предметов, а также способность оценивать количество следующих друг за другом раздражителей независимо от ритма их предъявления. Он разработал целый ряд экспериментов для оценки этих способностей.

В одной из задач исследователь предъявлял ворону или попугая карту с определенным числом точек на ней и обучал его открывать коробку с тем же числом точек на крышке независимо от их цвета, формы и взаимного расположения, которые постоянно менялись. Ставший знаменитостью ворон Якоб научился решать все предлагаемые задачи такого рода.

В следующей серии опытов птиц обучали съесть определенное число зерен. На полоску картона помещали слева одно зерно, а справа – два, и затем через дверцу впускали голубя. Когда голубь подходил к двум зернам, ему разрешали их съесть, когда же к одному – его прогоняли. Группы положительных и отрицательных стимулов меняли местами, чтобы не закрепился навык на место. Голуби легко отличали 1 от 2, 2 от 3 и так далее, вплоть до 5 от 6, дальше выбор делался неточным. Однако в данном случае наблюдался не настоящий счет, а скорее различение двух групп зерен по величине.

Ближе к настоящему счету ситуация, в которой птица различает число зерен не в группах, расположенных в поле зрения одновременно, а в группах, следующих друг за другом по времени. Сначала голубя приучали выбирать группу из двух зерен при наличии еще одного. После того, как первое зерно съедалось, голубю не разрешали трогать оставшееся зерно. Затем одно зерно из группы постепенно передвигали к центру полоски. Когда зерно достигало середины полоски, порядок 2:1 менялся на 1:1:1, то есть все три зерна располагались на одной линии на равном расстоянии одно от другого. Голубь по-прежнему съедал два зерна и не трогал третье. Но он мог клевать левое и среднее, среднее и правое, либо два крайних зерна. Контрольные опыты, в которых голубям предоставили полную свободу действий, выяснили, чему именно птицы научились. Когда на картоне находилось одно зерно, голубь съедал его, когда два – съедал оба. Однако когда клали четыре зерна, голубь съедал два, а два оставлял. Следовательно, голубь усвоил, что ему разрешено съесть два зерна, а не то, что ему нужно оставить одно. Точно так же из 3, 4, 5 голуби съедали 2 зерна, остальные оставляли. Далее, они научились съесть 3 зерна из 4–7, затем – 6 из 7–13. Последнее задание явилось пределом возможности голубя.

Особенно интересными были случаи, когда голуби переходили дозволенную границу. Например, иногда голубь, съев пятое, разрешенное, зерно, медленно и осторожно приближался к шестому, а когда оно было рядом, неожиданно быстро хватал его и мчался прочь, хлопая крыльями.

В другом опыте определенное число коробок, содержащих по одному зерну, расставляли между пустыми коробками. Птица, открывавшая коробки одну за другой, должна была остановиться, когда находила, например, пять зерен, независимо от того, сколько коробок ей пришлось для этого открыть. Оказалось, что птицы могут осваивать до четырех таких задач одновременно! Можно, например, научить сойку одновременно таким задачам: поднимать черные крышки, пока она не найдет два зерна, зеленые крышки пока не найдет три, красные, пока не найдет четыре, и белые, пока не найдет пять зерен.

Такое поведение позволяет думать, что птицы действительно умеют считать. Удалось, например, наблюдать, как сойка, обученная поднимать крышки, пока не найдет пять зерен, взяла только четыре из них, но затем повела себя необычно: остановилась перед первой коробкой, которая

была пуста, и сделала легкий поклон, затем два поклона перед второй и один перед третьей, после чего снова принялась поднимать крышки, пока не нашла пятое зерно. Келер полагал, что у птиц нет абстрактного понятия о числах в форме «цифр» или «слов», но они могут один раз покачать головой для обозначения единицы, два – для двух и т.д., то есть они учатся не считать до шести, а «действовать до шести».

Келер и его сотрудники проводили подобные опыты на разных животных и пришли к выводу, что галки и волнистые попугайчики способны узнавать множества до шести элементов, а белки, сороки и амазонские попугаи – до 7-ми.

Опыты Келера подвергались критике по поводу недостаточно высокого уровня контроля. Однако повторение их с помощью видоизмененных методик, включающих компьютерный контроль за выполнением экспериментов, подтвердило полученные ранее результаты. Так, в одном из экспериментов, голубей учили в камере Скиннера клевать один из двух ключей с нанесенными на них точками. Количество точек различалось лишь на одну. Если они клевали ключ с большим числом точек, то получали вознаграждение, а с меньшим – «наказание» (в камере выключали свет и опыт на короткий период прекращали). Голуби оказались способны отличать множества в переделах 7-ми точек, а их ответы при различиях 7/8 носили уже случайный характер (Emmerton, 2001).

Впоследствии выяснилось, что возможности птиц в принципе недооценивались. В ряде опытов подтвердилась их способность к точной оценке количества элементов в множествах и к упорядочиванию множеств по числу элементов. Так, одним из опытов голуби на первом этапе были приучены клевать ключ, если видели слайд с пятнышками «положительного» цвета (красного), и отказываться от клевания, если пятнышки были синими («отрицательный» цвет). На втором этапе голуби должны были выбирать между картинками с разным соотношением красных и синих пятен. Птицы не ошибались в выборе даже в тех случаях, когда на одном из слайдов красных, «положительных», было на одно пятно больше. Их не сбивало с толку и варьирование размеров пятнышек. В некоторых сериях опытов на одном из слайдов красных пятен хотя и было меньше, но они в целом занимали большую площадь, чем на втором, так как размер пятен был больше. Голуби уверенно выбирали картинку с большим числом красных пятен, чем синих (Honing, Stewart, 1989). Голуби продемонстрировали способность упорядочивать множества по числу элементов, используя принцип «больше, чем» (Emmerton et al., 1997).

Птиц приучали клевать правую сторону ключа, окрашенную красным, если в центре ключа они видели «много» точек (6–7), и левую, зеленую, если там было «мало» точек (1–2). После того как голуби усвоили условие задачи, им предложили новое число элементов, с которым они ранее не сталкивались, то есть 3, 4 и 5. Птицы успешно относили, скажем, 3 точки к разряду «мало», если в качестве альтернативы предлагалось 4 точки.

В опытах Зориной и Смирновой (1994, 1995) было показано, что серые вороны способны сравнивать множества по числу элементов в диапазоне 1–12 и 10–20. Способность к восприятию и точной оценке таких больших одномоментно предъявленных множеств вообще не была раньше известна у животных. Наиболее существенным свидетельством высокой степени абстрагирования авторы считают способность ворон переносить обобщение, сформированное у них для множеств диапазона 1–12 на новые множества диапазона 10–20, с которыми они раньше не встречались. При первых же предъявлениях новых множеств птицы, как правило, выбирали большее множество. Такой тип переноса навыка является одним из критериев сформированности «понятия числа».

Участник «языковых» экспериментов, серый жако Алекс смог ответить на вопросы о числе

предметов и об их количественных свойствах, используя английские слова. Он отвечал на вопросы о том, сколько каких предметов в гетерогенных множествах (четыре ключа, три пробки), а также о том, сколько углов в предъявляемой ему фигуре (треугольник, четырехугольник, шестиугольник). В целом было показано, что попугай способен адекватно использовать числительные для оценки гомо- и гетерогенных множеств в пределах 7-ми (Pepperberg, 1987).

Недавно было показано, что птицы способны к использованию символов для обозначения числа элементов в небольших множествах (Xia et al., 2000). Голубям в камере Скиннера предлагали ключ с изображением одного из 6-ти абстрактных символов (A, N, T, 4, U, 5). Этот ключ экспериментаторы назвали «символическим». Рядом располагался «пусковой» ключ (enter). Каждый символ, по условию задачи, соответствовал определенному числу клевков. Голуби получали награду только в том случае, если они совершали нужное число клевков по символическому ключу (в соответствии с показанным символом), а последний клевок нужно было сделать по пусковому ключу (нажать enter). После долгой тренировки 6 птиц смогли запомнить и аккуратно проделывать число клевков, соответствующее пяти символам, а 5 из них – шести.

### Четыре ноги

*Он, казалось, был чем-то удивлен. Глаза его возвращались к моим рукам. Он вытянул свою руку и стал медленно считать свои пальцы.*  
Герберт Уэллс «Остров доктора Моро».

Первые опыты, выявляющие способность к счету у четвероногих, были проведены на макаках резусах А. Киннаманом (Kinnaman, 1902). Он ставил в ряд 21 сосуд, из которых только один содержал лакомство, и тренировал двух обезьян выбирать 4-й сосуд от конца, затем 2-й, 5-й, 1-й, 9-й, 11-й, 8-й, 3-й, 10-й, 7-й, в нужной очередности. Одна из обезьян справлялась с заданием легко и после небольшого числа тренировок отличала позиции, вплоть до шестой. Вторая тренировалась долго и научилась искать нужный сосуд лишь до третьей с краю позиции. Для сравнения Киннаман тестировал детей трех и пяти лет, используя в качестве награды мраморные шарики для игры. Старший ребенок показал те же результаты, что и «отстающая» обезьяна, младший отыскивал шарики только в первом и во втором с краю сосудах. Эта методика и ее модификации применялись позднее к исследованию животных разных видов. Шимпанзе продемонстрировали очень большие индивидуальные различия в способностях решать такую задачу как открывание второй дверцы с дальнего конца ряда. Некоторые из них так и не справлялись с этой задачей, хотя ее успешно решали еноты, куницы, сунсы и домашние свиньи (см. обзор: Boysen, Hallberg, 2000).

В течение многих лет способности обезьян к оценке количества предметов исследовали с помощью метода выбора по образцу и висконсинского теста сортировки карточек. Ограниченной оказалась не столько компетенция животных, сколько возможность самого метода. Требовались сотни, а иногда и тысячи повторений для того, чтобы, скажем, научить обезьян, крыс и енотов отличать карточки с двумя и с одним кружками (Capaldi, Miller, 1988; Davis, Memmott, 1982).

В то же время использование тестов возрастной психологии позволило выявить у антропоидов неплохо развитые понятия о соотношении пропорций и объемов. Так, Вудруфф и Премак (Woodruff, Premack, 1981) применяли к четырем молодым и одному взрослому шимпанзе тест, разработанный Пиаже для определения возрастных изменений в суждениях о соотношении пропорций и объемов. Испытуемым предлагались стаканы, заполненные водой на 25%, 50%,

75% и 100%, и кружки, соответственно зачерненные на 25–100%. Они получали вознаграждение, если им удавалось привести в соответствие пропорции и объемы, то есть накрыть на четверть наполненный стакан – на четверть зачерненным кружком. Дети хорошо справляются с этим и подобными тестами в возрасте около четырех лет. Среди подопытных обезьян только взрослая справлялась с заданием, и делала это достаточно хорошо.

Существенно расширили знания о том, как животные оперируют количественными признаками предметов, опыты, проведенные с низшими обезьянами в лаборатории когнитивной приматологии Колумбийского Университета. Элизабет Бреннон и руководитель лаборатории Герберт Террейс выяснили, что макаки-резусы могут располагать картинками с разным количеством предметов по возрастанию и убыванию; более того, они способны переносить навыки, полученные при оперировании с последовательностью из меньшего числа предметов на последовательность из большего их количества (Brannon, Terrace, 1998). В качестве основы исследователи использовали метод серийного обучения, ранее разработанный Террейсом. В опытах участвовали макаки со звучными именами Розенкранц и Макдуф. На экране монитора обезьяны видели мелкие предметы (зайчики, сердечки, квадратики и т.п.), расположенные группами, от 1 до 10 предметов. В одном из экспериментов от обезьян требовалось, чтобы они дотрагивались на экране до групп предметов в порядке возрастания их количества в группе (один кружок – два кружка – три кружка – четыре кружка). При этом в каждой пробе варьировали как сами фигурки, так и местоположение групп предметов на экране, например, если в первой пробе один кружок находился посреди экрана, группа из двух – в правом верхнем углу, а группа из трех – в левом нижнем, то в следующей пробе одна уточка находилась в правом нижнем углу, две точки – в центре экрана, три – в левом нижнем углу и т.п. Кроме того, варьировали и относительные размеры фигурок, чтобы животные ориентировались именно по их количеству, а не по площади, занимаемой группой предметов. На тренировочном этапе макакам предъявляли 35 разных стимулов, по 60 раз каждый. На этапе «экзаменов» им демонстрировали 150 новых стимулов, показывая каждый только по одному разу (проводилось 5 серий по 30 тестов). Правильные действия поощрялись кусочком лакомства, ошибки «наказывались» тем, что экран на несколько минут гас. Розенкранц и Макдуф продемонстрировали способность «нумеровать» предметы от 1 до 4 и затем успешно переносить этот навык на последовательность с 5 до 9. В другом эксперименте они должны были «нумеровать» предметы в возрастающей последовательности, а затем переучиваться на последовательность убывающую, то есть, сначала 1–2–3–4, а затем 4–3–2–1.

В сходной ситуации шимпанзе научились использовать арабские цифры, то есть символы для обозначения числа элементов в предъявляемых им множествах. Т. Матсузава (Matsuzawa, 1985) воспитал математически одаренную шимпанзе Аи, названную так по первым буквам Artificial Intelligence (искусственный интеллект), с целью «противопоставления» успехов живого зверя достижениям роботов. Исследователь научил Аи устанавливать различия между группами картинок на экране и арабскими цифрами от 1 до 7. Результаты выбора Аи не зависели от размера, цвета, формы и взаиморасположения элементов в группах.

Сара Бойзен и ее коллеги разработали метод, который позволил, постепенно наращивая сложность заданий, показать, что шимпанзе способны не только оценивать, пересчитывать и обозначать число объектов, но и совершать элементарные арифметические действия (Boysen, Berntson, 1989, Boysen et al., 1993; Boysen, Hallberg, 2000). Шимпанзе Шебу научили практически всем элементам «истинного счета». Сначала обезьяну обучили класть только одну конфету в каждый из шести отсеков специального подноса. Ей демонстрировали соответствие «один к одному» между числом отсеков и числом конфет. На следующем этапе в ответ на предъявление подноса с одной, двумя и тремя конфетами Шеба должна была выбрать одну из

трех магнитных карточек с изображением такого же числа кружков. При верном соответствии числа кружков и конфет шимпанзе позволяли съесть конфеты. Потом на одной, двух и наконец на всех трех карточках кружки заменяли соответствующими арабскими цифрами. Когда Шеба стала безошибочно выбирать все три цифры, соответствующие числу конфет на подносе, обезьяне стали показывать цифры на мониторе. Теперь она должна была в соответствии каждой цифре выбрать карточку с изображением точек, то есть применить символы к обозначению уже других элементов – не конфет, а точек. Так Шеба освоила символы от 0 до 7. В одном из экспериментов Шеба научилась даже складывать цифры. На первом этапе по двум из трех тайников раскладывали апельсины таким образом, чтобы их в сумме было не больше четырех. Обезьяна обходила все три тайника и видела апельсины, но не могла их достать. Затем она должна была подойти к площадке с разложенными на ней карточками и выбрать цифру, соответствующую числу увиденных апельсинов. После этого плоды поступали в ее распоряжение. На втором этапе апельсины заменили карточками с цифрами (1 и 0, 1 и 1, 1 и 2, 1 и 3, 2 и 0 и 2 и 2 ). Шеба обходила тайники и затем находила карточку с цифрой, соответствующей сумме. В первой же серии испытаний она выбирала правильную цифру в достоверном большинстве случаев.

Особенно интересны эксперименты, в которых обнаруживались не только «арифметические» возможности животных, но и приоткрывались тайники их внутреннего мира. (Boysen, Hallberg, 2000). В опытах участвовали два взрослых животных, работающих «в команде». В первой серии опытов каждой из обезьян предоставляли выбор между двумя подносами с конфетами . На одном подносе конфет всегда было больше, чем на другом. Сумма конфет на двух подносах была постоянной (от 4 до 6). Как и следовало ожидать, обезьяны уверенно выбирали большее количество конфет. Затем опыт организовали таким образом, что одна обезьяна выбирала поднос, и именно выбранный отдавали ее соседке, а выбирающей доставался оставшийся. Таким образом, выбирая большее количество, обезьяна обрекала себя на получение меньшего. Рационально было бы всегда выбирать поднос с меньшим количеством конфет. Он и доставался бы другой обезьяне, а выбирающая оставалась бы в выигрыше. Но такая тактика оказалась выше сил шимпанзе. Видя конфеты, они всегда тянулись к большему их количеству. Обезьян поменяли ролями. Теперь та, что исполняла роль пассивного получателя конфет, могла применить полученный опыт и сообразить, как вести себя с большей выгодой. Но она вела себя также как и первая. Наконец, экспериментаторы, используя ранее разработанную методику, «объяснили» обезьянам соответствие числа объектов и абстрактных символов (арабских цифр). Когда «живые» конфеты заменили цифрами, обезьяны быстро научились выбирать меньшую цифру, так как им доставалось число конфет, соответствующее разности между постоянной суммой и выбранной цифрой.

## **Шесть ног**

*Вы не обидите меня только за то, что я – насекомое.*

Льюис Кэрролл «Алиса в Зазеркалье»

В наших экспериментах были выявлены арифметические способности у существ значительно менее внушительных, чем обезьяны и птицы, а именно, у рыжих лесных муравьев. Оказалось, что они могут считать в пределах нескольких десятков и даже прибавлять и отнимать в пределах 5. На первый взгляд, идея опытов кажется очень простой, но на деле нам понадобилось три года только для того, чтобы прийти к этой схеме экспериментов, да и то при «подсказке» самих муравьев. Здесь эти эксперименты будут изложены поэтапно.

В середине 1980-х годов мы предложили принципиально новый подход к изучению систем коммуникации и интеллекта животных, базирующийся не на попытках прямой расшифровки их

языка, а на использовании идей теории информации. Применение этого подхода позволило экспериментально доказать, что муравьи обладают сложной системой коммуникации, позволяющей им, в частности, передавать информацию о координатах объекта. Кроме того, этот же подход позволил показать, что муравьи способны использовать числа в пределах нескольких десятков (Резникова, Рябко, 1995, 1997).

В последние годы была разработана и проведена серия экспериментов, позволивших исследовать способность муравьев к сложению и вычитанию, правда, в весьма скромных пределах – до пяти (Резникова, Рябко, 1999; Reznikova, Ryabko, 2000, 2001). Идея этих экспериментов станет понятной, если проанализировать представление чисел в современных языках человека. Использование числительных требует некоторых арифметических операций. Особенно отчетливо это видно при использовании римских цифр. Например,  $VI=V+I$ ,  $IX=X-I$ , и т.д. В своих опытах мы специально вырабатывали у муравьев систему обозначения номера ветки с кормушкой, напоминающую «римский» способ представления чисел. Это, конечно, не означает, что муравьи обладают системой счисления и используют ее в своей повседневной жизни, но по условиям эксперимента от насекомых требовалось умение складывать и вычитать в пределах пяти.

Для исследований были выбраны рыжие лесные муравьи *Formica polyctena*, отличающиеся высоким уровнем социальной организации. Это обычные обитатели наших лесов, которые строят хорошо заметные муравейники из хвои и веточек. Лабораторная группа численностью около 2 тысяч особей помещалась на арену площадью 2 м<sup>2</sup>, в прозрачном гнезде, позволявшем учитывать контакты между ними. Все муравьи, участвовавшие в опыте, были помечены индивидуальными метками с помощью цветных точек нитрокраски, нанесенных на разные части тела. Муравьи получали пищу раз в 3 дня и только на экспериментальной установке. В основной серии опытов установка имела вид горизонтально расположенной «гребенки» с 40 «зубьями» (мы употребляли названия «ствол» и «ветки»), длиной по 10 см, на каждой из которых находилась кормушка, но только одна из них содержала сироп, а остальные – воду. В начальную точку «ствола» муравьи попадали по мостику. Для получения пищи муравьям было необходимо передавать сведения о номере ветки с кормушкой.

В более ранних экспериментах мы выяснили, что у муравьев исследуемого вида при необходимости группового решения сложных задач фуражировочная деятельность организована следующим образом: действуют постоянные по составу группы (4–8 особей), в каждой из которых поиском пищи занят один разведчик. Обнаружив пищу, он сообщает о ней только своей группе фуражиров (см. Резникова, Рябко, 1990; Резникова, 2000).

Во всех опытах 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. В этом случае 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.

Для того, 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 фуражирами. 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 этой 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).

Опишем сначала эксперименты, показывающие способность муравьев к оценке числа объектов и к передаче этой информации. В сериях опытов, которые проводились в 1984–87 и в 1992 гг., участвовало в общей сложности 32 группы фуражиров. Всего 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 оставшихся случаях муравьи приходили к пустым кормушкам и начинали искать пищу путем перебора соседних «веток». Во всех 35 опытах, в которых фуражиры не находили кормушку, работали одни и те же «неспособные» разведчики. Они выявлялись в ходе опытов и в дальнейшем не допускались на рабочую часть арены. Анализ длительности «сообщений» позволил предположить, что разведчик передавал фуражирам информацию о номере «ветки». Мы показали это, используя принятые в статистике методы (детально: Резникова, Рябко, 1995, 1997, 1999; Reznikova, Ryabko, 2000, 2001), а также проводя специальные контрольные опыты. При этом оказалось, что зависимость времени передачи информации  $t$  от номера «ветки»  $i$  приблизительно описывается эмпирическим уравнением вида  $t=ai$ , где  $a$  примерно равно 7.

Гипотетически муравьи могли бы передавать сведения не о номере ветки, а, скажем, о расстоянии до нее или о каких-либо других параметрах, например, о числе муравьиных шагов до кормушки и т.п. Даже если это предположение справедливо, то следует вывод о том, что муравьи оперируют количественными характеристиками и передают информацию о них друг другу. Для того, чтобы проверить это, мы в многочисленных сериях опытов варьировали форму и ориентацию самой установки (например, лабиринт-«гребенку» ставили не в горизонтальное, а в вертикальное положение, или сгибали в виде круга), а также изменяли как длину веток, так и расстояние между ними. Во всех случаях зависимость времени передачи сообщения  $t$  от номера ветки одинаково хорошо описывалась эмпирическими уравнениями вида  $t=ai+b$ . При этом значения параметров  $a$  и  $b$  близки для всех вариантов и не зависят ни от длины веток, ни от других параметров установок. Поэтому весьма вероятен вывод о том, что муравьи передают друг другу сведения именно о номере ветки. При этом получалось, что время «произнесения» муравьями числа 20 примерно в 2 раза больше, чем числа 10, и в 10 раз больше, чем числа 2.

В современных языках человека ситуациях совсем иная. Длина записи целого положительного числа  $i$  в десятичной системе счисления примерно равна  $\log_{10}(i)$ . Но люди не всегда использовали 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 два – «палец, палец», числу три – «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.

Перейдем к описанию пластичности «языка» муравьев и их способности к арифметическим операциям. Наши эксперименты основаны на том теоретико-информационном факте, что в «оптимальных» системах коммуникации время передачи сообщения ( $t$ ) и частота его

встречаемости ( $P$ ) связаны соотношением  $t = -\log(P)$  (в качестве сообщения можно рассматривать букву, слово, фразу и т.п.). Это соотношение проявляется, в частности, в том, что в естественных языках человека при возрастании частоты какого-либо сообщения длина кодирующего его слова уменьшается. Например, даже в официальных документах вместо «Правительство Российской Федерации» часто используют слово «Кремль», вместо «Правительство Соединенных Штатов» – «Белый Дом» и т.п.). В значительной степени этой же цели служат слова профессиональных жаргонов, аббревиатуры, местоимения и т.п.

В описываемых ниже опытах специально создавалась ситуация, когда частота использования одних чисел была существенно больше, чем других. Муравьям предлагалась такая же установка, что и раньше. 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  $i$ » в этой части эксперимента было примерно пропорционально  $i$ , как и в аналогичных опытах, описанных выше.

Во второй части эксперимента мы резко увеличили необходимость использования двух сообщений – «кормушка на ветке 10» и «кормушка на ветке 20», устанавливая кормушку на каждой из этих веток с вероятностью  $1/3$ , а на каждой из остальных 28 веток – с вероятностью  $1/84$ . В разные годы в качестве таких «особых» веток использовались различные номера – 10 и 20, 7 и 14 и т.п. Рассмотрим для примера ситуацию, в которой роль особых играли ветки 10 и 20. Разумеется, внешне они никак не отличались от остальных. Их «особость» для муравьев, по условию опыта, состояла в том, что сироп появлялся на каждой из них значительно чаще, чем на каждой остальных.

После серии опытов из нескольких десятков повторностей муравьи существенно сократили время передачи сообщения «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 свою систему 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 при представлении чисел, присущем современным языкам человека, использование числительных требует некоторых арифметических операций. Особенно отчетливо это видно при использовании римских цифр. Например, записывая «шесть» в виде VI, мы вычисляем  $VI = V + I$ , аналогично  $XII = X + II$ ,  $IX = X - I$  и т.д. В эксперименте мы специально вырабатывали у муравьев систему счисления, напоминающую «римский» способ представления чисел. На третьем этапе 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 ( $t$ ) сведений о том, что кормушка находится на «ветке» с номером  $i$  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. Так, например, на передачу сообщения о том, что кормушка находится на ветке №11, на первом этапе муравьи затрачивали 70–82 с, а на передачу сообщения о первой ветке от 8 до 12 с. На третьем этапе на передачу сообщения о ветке 11 затрачивалось 5–15 с (вспомним 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. Как уже отмечалось, аналогичные опыты проводились по той же схеме, но с «особыми ветками» 7 и 14 в 1992 г. и 10 и 19 – в 1994 г. Результаты во всех случаях были сходными.

Таким образом, наши 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). Это существенно превышает результаты, показанные ранее позвоночными животными. Вряд ли это означает, что муравьи «умнее», чем, скажем, шимпанзе. Скорее всего, дело здесь в разработке нового метода, который позволил эти способности выявить и который пока не был применен к другим животным.