

Адаптация к решению частных задач и «глобальные» цели в поведении животных

Непомнящих В.А.

Институт биологии внутренних вод РАН
им. И.Д. Папанина
nepom@ibiw.yaroslavl.ru

Аннотация. Поведение животных адаптивно: они способны варьировать свое поведение в зависимости от изменений в окружающей обстановке. Это свойство дает возможность успешно решать стоящие перед животным задачи, например, поиск пищи. Однако в поведении животных постоянно присутствует цель, независимая от частных задач: достижение определенного баланса между поиском новой, непредсказуемой стимуляции и стремлением к предсказуемости результатов своего поведения. Эта цель делает поведение животного автономным, позволяя самостоятельно выбирать задачи, которые оно будет решать. В то же время, она может мешать адаптивному решению той или иной частной задачи.

Ключевые слова: животные, искусственные агенты, адаптивное поведение, автономное поведение.

Введение

Животные способны решать стоящие перед ними задачи в плохо предсказуемой, изменчивой естественной среде. Эта способность позволяет надеяться, что принципы, на которых основано поведение животных, могут быть использованы для создания адаптивных искусственных агентов. Такие агенты должны решать различные задачи, самостоятельно адаптируясь к изменениям обстановки, которые невозможно заранее предусмотреть в программе, управляющей агентом. В этом направлении достигнуты значительные успехи (Floreano, Mattiuss, 2008). Однако большинство работ в данной области явно или неявно основано на предположении, что поведение животного сводится к решению набора частных задач, таких как питание, размножение или защита от хищников. Соответственно, об адаптивности поведения животного или искусственного агента следует судить по тому, насколько эффективно им решена та или иная задача.

Однако данные об организации поведения животных показывают, что они могут преследовать цель более высокого уровня, чем решение набора задач, пусть и очень большого. Стремление к этой цели, возможно, является необходимой предпосылкой автономии, но, в то же время, может вступать в противоречие с адаптивным решением конкретных задач. Здесь мы рассмотрим эти данные, а также то, как они могут быть использованы для создания автономных адаптивных агентов.

Поиск новизны животными

Степень адаптации к решению какой-либо частной задачи можно оценить, основываясь на моделях оптимального поведения. Эти модели основаны на следующем допущении: поведение животного направлено на достижение максимальной выгоды при минимуме затрат времени и энергии (Stephens, Krebs, 1986). Например, если у животного есть выбор между двумя участками с кормом, то для достижения этой цели требуется сосредоточить сбор корма на том участке, где его плотность выше и где его легче найти и собрать (Charnov, 1976; Green, 1987).

Исследования пищевого поведения животных показывают, что оно в целом соответствует предсказаниям моделей – но только при условии, что уровень голода высок. Если же пищевая мотивация не слишком сильна, то наблюдаются существенные отклонения от оптимального поведения. Примером могут служить эксперименты с монгольскими песчанками, в которых эти грызуны могли выбирать, на каком из двух участков искать пищу (Forkman, 1996). На одном участке находились необработанные зерна, а на другом – очищенные. В другом эксперименте на одном участке зерна были приклеены к палочкам (что затрудняло их сбор), а на другом – нет. В обоих экспериментах полевки могли видеть пищу одновременно на обоих участках и чаще выбирали участки, где для кормления требовалось меньше усилий, т. е. с зернами без оболочки и не приклеенными. Такое поведение можно рассматривать как оптимальное решение задачи.

Однако поведение песчанок менялось, если на одном из участков зерна были по-прежнему хорошо видны, а на другом были прикрыты крышками или лежали на маскирующей поверхности, так что полевки не могли обнаружить их сразу. Полевки выбирали второй участок, где им приходилось тратить время и усилия на поиск зерен.

Аналогичные результаты получены со скворцами. Им предлагали миски с одинаковым количеством корма, смешанного с песком. Одна из мисок была прикрыта прозрачной крышкой, а другая – непрозрачной, причем скворцы могли легко пробить крышки клювом и достать корм. Птицы предпочитали добывать корм в миске с непрозрачной крышкой, несмотря на то, что им приходилось искать там корм вслепую. Это предпочтение имело место, даже если корма в миске с непрозрачной крышкой было меньше (Bean et al., 1999). В другом эксперименте скворцы чаще выбирали для питания участки с менее предсказуемым расположением пищи по сравнению с участками, где пищевые объекты были расположены всегда одинаково (Talling et al., 2002).

Таким образом, животные не обязательно выбирают наиболее адаптивный способ решения задачи. Такому решению препятствует их стремление к участкам с непредсказуемыми свойствами, к новизне. Подобное поведение было обнаружено у животных разных видов. Чтобы объяснить его, была выдвинута гипотеза «уменьшения неопределенности» – «uncertainty reduction» (Inglis et al., 1997; Inglis, 2000; Inglis et al., 2001). Гипотеза предполагает, что у животного **постоянно** присутствует мотивация к сбору информации о среде. Пока другие мотивации, например, голод, слабы, эта мотивация доминирует и соответствующее ей исследовательское поведение приводит к уменьшению неопределенности среды. При промежуточном уровне голода пищевое поведение и исследо-

Адаптация к решению частных задач и «глобальные» цели в поведении животных

вание осуществляются одновременно, и не оптимальным образом, так как мешают одно другому. Только при сильном голоде и наличии пищи исследовательское поведение подавляется (Inglis, Langton, 2006).

Аналогичные отклонения от оптимального поведения известны и у беспозвоночных, например, муравьев. Если им в знакомом лабиринте предлагают находить и транспортировать в гнездо собственных куколок, то муравьи идут к куколкам по кратчайшему пути. Если же в том же лабиринте находится пища, то муравьи могут тратить время на блуждание в лабиринте, несмотря на то, что местонахождение пищи им хорошо известно. Такое поведение можно понять, если учесть, что возвращение куколок в гнездо гораздо важнее добычи пищи. В последнем случае пищевое поведение сочетается с исследованием лабиринта (Удалова, Карась, 1986).

Стремление к предсказуемости

Наряду с поиском новизны у животных известна и противоположная тенденция: стремление к предсказуемой среде, в том числе к предсказуемости результатов своих действий, что дает возможность контроля над средой. Например, у ночных грызунов – оленьих хомячков, которые обычно избегают яркого света, реакция на него различается в зависимости от ожиданий животного. При искусственном суточном ритме освещения и темноты хомячки нажимали на рычаг, чтобы выключить свет, когда он автоматически включался в определенное, предсказуемое время. Однако если свет неожиданно выключался днем, они нажимали на рычаг, чтобы включить его. Их стремление к контролю над средой, неприязнь к непредсказуемым изменениям оказалось сильнее неприязни к свету (Kavanau, 1963).

Стремление к предсказуемости, как и стремление к новизне, часто оказывается неадаптивным с точки зрения теории оптимального поведения. Крысам в эксперименте предоставляли выбор между двумя ситуациями, в которых они получали удар током. В одной ситуации удар следовал в предсказуемые моменты времени, а в другой – нет. Крысы предпочитали предсказуемую ситуацию. Это предпочтение наблюдалось, даже если предсказуемый удар был в несколько раз сильнее непредсказуемого (Badia et al., 1979). Подобные факты можно объяснить тем, что животному необходимо подтверждение своей способности контролировать внешнюю среду (Brembs, 2009), и эта необходимость может пересиливать страх.

Предпочтение новизны с одной стороны, и предсказуемости и контроля – с другой внешне противоречат друг другу. В связи с этим делаются попытки выработать единое представление о стремлении животных к предсказуемости и непредсказуемости, а также о том, как эти стремления связаны с целями их поведения.

Баланс между новизной и предсказуемостью

Стремление к новизне может ограничивать способность животного оптимально решать текущие задачи. Однако это стремление, в свою очередь, может быть ограничено тем объемом новой информации, которое животное готово

воспринимать. Поэтому в поведении животных можно увидеть стремление к равновесию между новизной и предсказуемостью. Это лучше всего видно при исследовании животным новой для него обстановки, например при исследовании мышами круглой арены, на которую мыши могут выходить из убежища (Benjamini et al., 2011; Fonio et al., 2009). В поведении мышей можно выделить повторяющиеся поведенческие последовательности (далее – «мотивы»). Например, на начальной стадии обследования мыши, выйдя из убежища, бегут вдоль стенки арены в определенную сторону (вправо или влево), возвращаются к убежищу, снова бегут в ту же сторону, но при этом проходят большее расстояние, снова возвращаются и т.д. Затем это поведение сменяется другим мотивом: повторяющимися и постепенно удлиняющимися пробегами в противоположную сторону. За этим следуют выходы к центру арены, также повторяющиеся один за другим, причем с каждым повторением мышь все больше приближается к центру. В ходе обследования мотив может усложняться: например состоять из пробега вдоль стенки с выходом в центр арены. Такие сложные мотивы также повторяются. Наконец, мотивы, сменившиеся другими мотивами, могут проявиться снова и при этом также повторяются.

Аналогичные мотивы наблюдались нами у рыб, помещенных в аквариумы сложной формы, с многочисленными углами (неопубликованные данные). Мотив мог заключаться в челночных перемещениях вдоль стенки, ограниченной двумя углами. Затем следовали такие же челночные перемещения вдоль других стенок. Как и у мышей, простые мотивы усложнялись: например, наблюдалось движение вдоль двух или трех смежных стенок. В этом случае рыбы не реагировали на углы, разделяющие эти стенки.

Такое поведение можно объяснить следующим образом. Животное может усвоить в данный промежуток времени только ограниченный объем новой информации. Поэтому мотивы ограничены во времени и пространстве. При повторении мотива уже приобретенная информация становится привычной и к ней добавляется новая при удлинении и усложнении мотива (Benjamini et al., 2011).

По существу, это объяснение предполагает стремление животного к определенному балансу между новизной и предсказуемостью. Животное проверяет, насколько оно способно предсказывать и контролировать события в среде. Выполняя определенную цепочку действий (мотив), оно запоминает соответствующую им цепочку раздражителей. Повторяя эту цепочку в прямом и обратном порядке, оно проверяет, насколько предсказуемы последствия его действий, т.е. насколько оно может контролировать поток внешней стимуляции. Повторение мотива прекращается, и он сменяется другим после того, как предсказуемость достигает некоторого уровня. После этого мотив удлиняется или сменяется новым мотивом: животное проверяет, насколько предсказуема стимуляция на новых участках пространства.

«Произвольная» реакция на стимуляцию

В предыдущем разделе отмечалось, что при смене мотива меняется и реакция рыб на углы в аквариуме: если один мотив включает поворот в углу и движение в обратном направлении, то при выполнении другого мотива рыба может

Адаптация к решению частных задач и «глобальные» цели в поведении животных

идти вдоль стенок аквариума, не обращая внимания на тот же самый угол. Такое «произвольное» переключение внимания к внешней стимуляции известно у многих животных, позвоночных и беспозвоночных. Примером переключения может служить поведение дрозофил в установке для имитации полета. Дрозофилу закрепляют на вертикальной оси за спинку так, чтобы её ноги не касались поверхности. В отсутствие контакта с поверхностью у мух запускается «полет», в том числе попытки поворачивать в горизонтальной плоскости вправо и влево с помощью маневров крыльями. Усилия, прилагаемые насекомым для поворота, измеряются датчиками. Если закрепленную дрозофилу поместить внутрь вращающегося цилиндра с нанесенными на его поверхность вертикальными полосами, то у неё наблюдается оптомоторная реакция: попытки поворачиваться вслед за движением полос. Если же полосы в поле зрения левого глаза насекомого движутся влево, а полосы в поле зрения правого глаза – вправо, то дрозофила переключается между противоположными реакциями. В течение некоторого времени она пытается поворачиваться вслед за полосами в поле зрения левого глаза, а затем – за полосами в поле зрения правого глаза. Кроме того, время от времени оно перестает обращать внимание на движение полос и «летит» прямо.

Изменениям в поведении соответствуют изменения в активности нейронов зрительных центров дрозофилы. Когда она пытается следовать за полосами в левом поле зрения, активность нейронов, получающих сигналы от левого глаза, усиливается, а от правого – снижается. При смене направления поворотов соотношение активности нейронов меняется на противоположное. Это изменение нейронной активности происходит, несмотря на то, что сигналы, поступающие от зрительных клеток на те и другие нейроны, не изменяются: закрепленная дрозофила не может повернуться на сколько-нибудь значительный угол и поэтому всегда видит одну и ту же картину – полосы, движущиеся в противоположные стороны (Tang, Juusola, 2010).

Аналогичным образом варьирует тенденция дрозофилы поворачивать в сторону движущихся изображений, например, квадрата и креста, нанесенных на вращающийся цилиндр и поочередно попадающих в поле её зрения. Насекомое может обращать внимание на квадрат, поворачиваться к нему каждый раз, когда видит его, но игнорировать крест, когда он появляется в поле зрения вместо квадрата. Затем отношение к этим изображениям изменяется на противоположное, снова восстанавливается и т.д. (Miller et al., 2012).

Вероятно, такое чередование периодов внимания к разным стимулам также можно объяснить с точки зрения поддержания баланса между новизной и предсказуемостью. При повторных попытках повернуться к изображению дрозофила получает одну и ту же стимуляцию. Соответственно, результат поворота предсказуем и насекомое переключается на другое изображение.

Баланс новизны и предсказуемости у робота

Представления о балансе новизны и непредсказуемости были использованы для программирования робота – «собаки» Eibo (Oudeyer, Kaplan, 2004; 2007). Для этого была постулирована мотивация к максимально успешному обучению как единственной цели поведения робота. Никаких конкретных задач, которые

Непомнящих В.А.

могли бы решаться с помощью обучения, роботу не ставилось. Как и во многих других исследованиях в области искусственного интеллекта, использовался метод обучения, при котором агент предсказывает результат своих действий и затем измеряет ошибку предсказания: разность между предсказанным и полученным результатами.

В дополнение к этому, робот запоминает и динамику изменений ошибки при повторении определенного действия и определенной внешней стимуляции (например, для повторных подъемов лапы в присутствии куклы в поле зрения). Чем быстрее снижается ошибка, тем, естественно, успешнее обучение. Если обучение идет успешно, то робот раз за разом повторяет это действие, варьируя его случайным образом. Если скорость снижения ошибки становится меньше некоторой пороговой величины, это означает, что в дальнейшем обучении нет смысла. В этом случае робот переключается на другую ситуацию, например, поворачивается к другому предмету.

Переключение происходит и тогда, когда ошибка выше порога, но не снижается при повторении действия: это означает, что данная ситуация непредсказуема, робот не может её контролировать, а потому попытки обучения бессмысленны. При переключении обычно выбирается такое действие, которое в прошлом обеспечивало наиболее быстрое снижение ошибки. Кроме того, с некоторой вероятностью новое действие может быть выбрано случайно. Наконец, результаты и ошибка предсказания того или иного действия со временем забываются. В результате робот может возвращаться к действиям и ситуациям, которые он уже «изучал» (Oudeyer, Kaplan, 2004).

По существу, мотивация к максимально успешному обучению аналогична мотивации к сохранению баланса новизны и предсказуемости: если ошибка велика и не снижается, то новизна слишком высока, если же она мала и снижается слишком медленно, то слишком высока предсказуемость. В обоих случаях робот меняет свое поведение, чтобы ввести соотношение новизны и предсказуемости в определенные пределы.

В эксперименте робот был помещен на площадку с различными предметами, которые могли сдвигаться, раскачиваться или издавать звук, если робот касался, толкал или кусал их. В начале обучения робот мог совершать только элементарные действия: поднимать лапу, поворачивать голову, совершать «кусающие» движения ртом и фиксировать «глаза»-видеокамеры на объектах, попавших в его поле зрения. Выбор этих действий на начальном этапе обучения происходил случайным образом.

В ходе обучения поведение робота усложнялось. От простых движений головой и конечностями он переходил к движениям, направленным на определенные предметы, к поворотам тела, передвижению в пространстве вперед и назад, а затем и к манипуляциям предметами (Oudeyer et al., 2005; видеозапись постепенного усложнения поведения робота имеется на сайте: <http://playground.csl.sony.fr/en/pag7-Video.html>). Это обусловлено тем, что робот не только повторял, но и варьировал свои движения. Вариации приводили к тому, что очередное движение в сторону предмета могло случайно привести к тактильному контакту с ним, его раскачиванию или звуку. В результате ошибка предсказания результата действия увеличивалась и, соответственно, робот про-

Адаптация к решению частных задач и «глобальные» цели в поведении животных

должал «изучать» новую ситуацию, пока не устанавливал предсказуемой связи между своими манипуляциями с предметом и их результатом.

Поведение робота было организовано во времени. Разные движения и манипуляции с объектами происходили не в случайном порядке. В некотором интервале времени робот был занят одним предметом, затем временно переключался на другой, потом третий, затем мог снова вернуться к первому и т.д. Эта упорядоченность поведения была вызвана тем, что интерес к исследуемому объекту сохранялся определенное время, так как ошибка предсказания снижалась постепенно. (Oudeyer, Kaplan, 2006).

Следует еще раз подчеркнуть, что извне роботу не ставились ни задача научиться ходить и манипулировать объектами, ни усложнение поведения в целом. Более того, формирование роботом сложного и разнообразного поведения было бы невозможно, если бы агенту была бы поставлена конкретная задача, например, научиться подходить к какому-нибудь предмету. Он бы выучился только подходить, но не манипулировать этим предметом или отступать назад (Oudeyer et al., 2005). Автономное формирование разнообразных форм поведения происходило вследствие того, что вместо конкретных задач роботу была поставлена одна сверхзадача: поддерживать баланс между новизной и предсказуемостью.

Регуляция уровня стресса

Достижение баланса между новизной и предсказуемостью может и не быть самостоятельной целью поведения животного. Высокий уровень непредсказуемости среды, невозможность её контролировать действует как стрессовый фактор (Симонов, 1970). Соответствие скорости поступления новой информации имеющимся возможностям обработки новых сигналов способствует состоянию психологического комфорта. В этом случае текущее поведение продолжается (например, приближение к незнакомому объекту). Если поступление информации превышает возможности её обработки, то это является стрессовым фактором, поэтому животное выбирает более предсказуемую обстановку. И наоборот, если возможности оказываются больше, чем требуется, это также приводит к стрессу. В результате животное проявляет исследовательское поведение, стремление к новизне (Inglis, Langton, 2006).

На этом основании можно предположить, что регуляция животным соотношения новизна/предсказуемость – лишь один из способов поддержания оптимального уровня стресса, которое и является целью поведения. Если это предположение верно, то и другие стрессовые факторы, помимо непредсказуемости, должны подавлять исследовательское поведение и увеличивать стремление к привычной обстановке. Именно это и происходит во многих случаях, например при стрессе, вызванном изоляцией от привычной обстановки. В частности, так можно объяснить стереотипное поведение при изолированном содержании животных в зоопарках. Изоляция является стрессовым фактором, а стереотипное поведение приводит к предсказуемому повторению одной и той же стимуляции. Эта предсказуемость снижает стресс. Аналогичным образом и другие стрессовые факторы (непредсказуемость среды, хищники, конфликты с особями своего вида), заставляя животное стремиться к предсказуемости (Попов, 2006; 2010).

Если же стресс слишком низок, животное стремится к новизне (Попов, 2010). В пользу этого предположения говорят данные о индивидуальных различиях в отношении к новизне у крыс. Разные особи в разной степени предпочитают новизну, если у них есть выбор между привычной обстановкой и незнакомой. У особей, склонных к новизне, в новой обстановке повышается уровень кортикостероидных гормонов, что является одним из показателей стресса. Возможно, эти особи стремятся к более высокому уровню стресса, чем другие, поэтому и предпочитают новизну (Dellu et al., 1996).

Известно, что от уровня стресса зависит физическое состояние животных и, в конечном итоге, их способность к размножению и выживанию (Bassett, Buchanan-Smith, 2007). Таким образом, способность животного поддерживать определенное равновесие между предсказуемостью и непредсказуемостью имеет самостоятельный адаптивный смысл как регулятор стресса, независимо от влияния этой способности на решение частных задач.

Заключение. Поведение животного и поведение машины

Приведенные данные показывают, что оптимальное решение частных задач, встающих перед животным, не является единственной целью его поведения. Наряду с этими целями есть и другая цель. Эта цель присутствует постоянно, независимо от конкретной задачи, которую решает животное. Она заключается в достижении определенного баланса между предсказуемостью и непредсказуемостью среды, в которой действует животное. Предсказуемость означает, что можно предвидеть последовательность стимулов, которые организм получает при выполнении той или иной последовательности действий. Непредсказуемость означает, что предвидение не оправдывается. Эта цель может препятствовать тому, чтобы решение той или иной частной задачи животным было не просто адаптивным, но и оптимальным – т.е. препятствовать максимизации отношения выгод к затратам.

С другой стороны, эта цель адаптивна в стратегическом смысле. Она позволяет найти приемлемое решение для тех же задач при изменении среды. Эта цель реализуется в виде исследовательского поведения и, в конечном итоге, позволяет построить когнитивную карту пространства, в которой решается задача. Например, при обучении находить корм в сложном лабиринте, крысы и другие животные не просто запоминают путь к кормушке, но осваивают лабиринт в целом. При этом они формируют последовательности действий, по существу аналогичные мотивам, о которых говорилось выше. Если в эксперименте привычный путь к кормушке закрывали перегородкой, животные быстро находили обходной путь, руководствуясь знанием структуры лабиринта (Никольская, Сагимбаева, 1986; Бережной, Никольская, 2012). Авторы этого исследования пришли к выводу, что «если мы хотим приблизиться к целенаправленному, а значит адаптивному поведению, необходимо учитывать, что достижение приспособительного результата, получение подкрепления, это лишь одна из задач, стоящих перед животным в среде, наряду с созданием образа пространства и выявлением причинно-следственных связей» (Бережной, Никольская, 2012). Аналогичным образом, поведение робота Aibo трудно назвать адаптивным с позиций прямолинейного адапционизма. Он не решает конкретных задач, не говоря уже об

Адаптация к решению частных задач и «глобальные» цели в поведении животных

оптимальном решении. Однако разнообразное поведение, которое у него автономно формируется, могло бы стать основой для адаптивного поиска определенных предметов или решения других задач.

Еще одно адаптивное преимущество, которое дает стремление к указанному балансу, заключается в том, что он приводит к избеганию ситуаций, в которых животное не способно предвидеть изменения в среде и результаты своих действий: такие ситуации потенциально опасны. Наконец, это стремление помогает регулировать уровень стресса и, соответственно, повышает вероятность выживания животного.

И все же наиболее существенное следствие этого стремления – способность автономно формировать задачи поведения, осваивать различные навыки от передвижения в пространстве до манипулирования предметами – как это показывает пример с развитием поведения робота. Важно отметить, что поиск равновесия между новизной и предсказуемостью, обеспечивающий автономию, продолжается в течение всего развития организма. Многочисленные исследования развития психики детей, начиная с момента рождения, показывают, что именно этот поиск лежит в основе развития поведения ребенка – от способности самостоятельно усваивать простые причинно-следственные связи между событиями в окружающем мире до формирования социальных отношений (см. обзор: Oudeyer, Kaplan, 2007).

Из сказанного следует, на наш взгляд, что существующие в настоящее время искусственные агенты, в том числе роботы, созданные для адаптивного решения заранее заданного набора конкретных задач, остаются всего лишь машинами, даже если управляющие ими программы основаны на знаниях о решении аналогичных задач животными. Цель такого агента – выполнение определенных функций для заказчика. Даже если целью ставится сбор информации о среде, эта цель оказывается чаще всего единственной, а потому частной. Цель животного – достижение баланса между предсказуемостью и непредсказуемостью. Наличие этой глобальной цели позволяет животному осваивать мир, приобретать новые навыки и решать задачи, которые не поставлены извне, а формируются автономно в ходе освоения мира. Соответственно, действительно автономный робот должен преследовать аналогичную цель.

Литература

1. Бережной Д. С., Никольская К. А. Всегда ли поведение животных адаптивно? // XIV Всероссийская научно-техническая конференция «Нейроинформатика-2012»: Сборник научных трудов. В 3-х частях. Ч. 2. М.: НИЯУ МИФИ, 2012. С. 101-109.
2. Никольская К. А., Сагимбаева Ш. К. Закономерности интегративной деятельности мозга позвоночных // Механизмы адаптивного поведения. Сборник научных трудов. Л.: Наука, 1986. С. 120 – 130.
3. Попов С. В. Проблема адаптивности при исследованиях социальных структур // Журн. общ. биологии. 2006. Т. 67. № 5. С. 335–343.
4. Попов С. В. Неопределенность внешней среды и возбуждение/стресс как детерминанты поведения // Журн. общ. биологии. 2010. Т. 71. № 4. С. 287–297.
5. Симонов П. В. Теория отражения и психофизиология эмоций. М.: Наука, 1970.

Непомнящих В.А.

6. Удалова Г. П., Карась А. Я. Асимметрия направления движения у муравьев *Mutrica rubra* при обучении в лабиринте в условиях пищевой мотивации // Журн. высш. нервн. деят. 1986. Т.36. №. 4. С. 707-714.
7. Badia P., Harsh J., Abbott B. Choosing between predictable and unpredictable shock conditions: data and theory // *Psychol. Bull.* 1979. V. 86. P. 1107–1131.
8. Bassett L., Buchanan-Smith H.M. Effects of predictability on the welfare of captive animals // *Applied Animal Behaviour Science.* 2007. V. 102. P. 223–245.
9. Bean D., Mason G.J., Bateson M. Contrafreeloading in starlings: testing the information hypothesis // *Behaviour.* 1999. V. 136. P. 1267-1282.
10. Benjamini Y., Fonio E., Galili T., Havkin G. Z., Golani I. Quantifying the buildup in extent and complexity of free exploration in mice // *Proc. Nat. Acad. Sci. USA.* 2011. V. 108. Supplement 3. P.15580–15587.
11. Brembs B. The importance of being active // *J. Neurogenet.* 2009. V. 23. P.120–126.
12. Charnov E.L. Optimal foraging and marginal value theorem // *Theor. Pop. Biol.* 1976. V.9. №1. P.129-136.
13. Delli F., Piazza P.V., Mayo W., Le Moal M., Simon H. Novelty-seeking in rats – biobehavioral characteristics and possible relationship with the sensation-seeking trait in man // *Neuropsychobiology.* 1996. V. 34. P. 136–145.
14. Floreano D., Mattiussi C. *Bio-Inspired Artificial Intelligence: Theories, Methods, and Technologies.* Cambridge, USA: MIT Press, 2008.
15. Fonio E., Benjamini Y., Golani I. (2009) Freedom of movement and the stability of its unfolding in free exploration of mice // *Proc. Nat. Acad. Sci. USA.* 2009. V. 106. P. 21335–21340.
16. Forkman B. The Foraging behaviour of mongolian gerbils: A behavioural need or a need to know? // *Behaviour.* 1996. V. 133. P. 129–143.
17. Green R.F. Stochastic models for optimal foraging // *Foraging behaviour* / Eds. Kamil A.C. Krebs J.R., Pulliam H.R. N. Y.: Plenum Press, 1987. P.273-302.
18. Inglis I. R. The central role of uncertainty reduction in determining behaviour // *Behaviour.* 2000. V. 137. P. 1567–1599.
19. Inglis I. R., Forkman B., Lazarus J. Free food or earned food? A review and fuzzy model of contrafreeloading // *Anim. Behav.* 1997. V. 53. P. 1171-1191.
20. Inglis I. R., Langton S. How an animal's behavioural repertoire changes in response to a changing environment: a stochastic model // *Behaviour.* 2006. V. 143. P. 1563–1596.
21. Inglis I. R., Langton S., Forkman B., Lazarus, J. An information primacy model of exploratory and foraging behaviour // *Animal Behaviour.* 2001. V. 62. P. 543-557.
22. Kavanau J. L. Compulsory regime and control of environment in animal behaviour. I. Wheel – running // *Behavior.* 1963. V. 20. P. 251–281.
23. Miller S. M., Ngo T. T., Swinderen B., van. Attentional switching in humans and flies: rivalry in large and miniature brains // *Frontiers in Human Neuroscience.* 2012. V. 5. Article 188. P. 1–17. www.frontiersin.org
24. Oudeyer P.-Y., Kaplan F. Intelligent adaptive curiosity: a source of self-development // Berthouze L. et al., eds. *Proceedings of the 4th International Workshop on Epigenetic Robotics.* Lund University Cognitive Studies. 2004. V. 117. P. 127–130.
25. Oudeyer P.-Y., Kaplan F., Hafner V. V., Whyte A. The playground experiment: Task-independent development of a curious robot // Bank D., Meeden L., eds. *Proceedings of the AAAI Spring Symposium on Developmental Robotics,* 2005. Stanford, California, USA, 2005. P. 42–47.
26. Oudeyer, P.-Y. Kaplan, F. Discovering communication // *Connection Science.* 2006. V. 18. P. 189–206.
27. Oudeyer P.-Y., Kaplan F. What is intrinsic motivation? A typology of computational approaches // *Frontiers in Neurobotics.* 2007. V. 1. Article 6. P. 1-14. www.frontiersin.org

Адаптация к решению частных задач и «глобальные» цели в поведении животных

28. Stephens D. W., Krebs J. R. Foraging theory. Princeton: Princeton Univ. Press, 1986.
29. Talling J. C., Inglis I. R., Van Driel K. S., Young J., Giles S. Effect of hunger on starling's preferences for food sources associated with variability or uncertainty // Behaviour. 2002. V. 139. P. 1223–1235.
30. Tang S., Juusola M. Intrinsic activity in the fly brain gates visual information during behavioral choices // PLoS ONE. 2010. V. 5. P. 1–19. e14455. www.plosone.org

Статья поступила 19 августа 2012 г.