

НЕПОМНЯЩИХ В.А.¹⁾, ОСИПОВА Е.А.¹⁾, РЕДЬКО В.Г.²⁾, ШАРИПОВА Т.И.²⁾, БЕСХЛЕБНОВА Г.А.²⁾

¹⁾ Институт биологии внутренних вод РАН им. И.Д. Папанина
п. Борок, Ярославская обл.

²⁾ Научно-исследовательский институт системных исследований РАН, Москва
vgredko@gmail.com

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ПРЕДСКАЗАНИЙ У РЫБ, ИЗУЧАЮЩИХ ЛАБИРИНТЫ*

Представлен начальный этап моделирования познавательных способностей рыб, изучающих лабиринты. Построена модель формирования предсказаний рыбами. Согласно модели уверенность рыб в предсказаниях постепенно возрастает. Результаты компьютерного моделирования качественно согласуются с экспериментальными биологическими данными.

Ключевые слова: моделирование поведения животного, исследовательское поведение, мотивация

1. Введение

В поведении животных постоянно присутствуют две противоположные тенденции, не связанные непосредственно с физиологическими потребностями. Одна из них – поиск новой, *непредсказуемой* стимуляции, выражающийся в исследовательском поведении, а другая – стремление *предсказывать* результаты своего поведения [1-3].

Постоянная мотивация к сбору информации об окружающей среде преобладает, если основные потребности (например, в пище) удовлетворены (гипотеза «уменьшения неопределенности», [4, 5]). Исследовательское поведение животного приводит в этом случае к уменьшению неопределенности. В ситуации, когда животное сильно голодно и видит пищу, исследовательское поведение отсутствует [4].

Стремление животных к предсказуемости результатов своих действий дает им возможность контролировать окружающую среду. Важная роль накопления знаний для жизни биологических организмов подчеркивается в работах А.А. Жданова [6].

* Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 13-01-00399.

Эти две тенденции (стремление и к новизне, и к предсказуемости) в поведении животных являются на первый взгляд противоречащими друг другу. Однако между новизной и предсказуемостью устанавливается определенный баланс. Представления о балансе новизны и предсказуемости в поведении животных были успешно реализованы в программах управления робота – «собаки» Aibo [7, 8].

Важно подчеркнуть, что накопление знаний при исследовательском поведении животных является предшественником развития знаний человека при его творческой поисковой активности.

В настоящей работе строится компьютерная модель предсказательной способности рыб. При моделировании учитывается то, что в поведении животных постоянно присутствуют две указанные противоположные тенденции: 1) поиск новой, непредсказуемой стимуляции и 2) стремление предсказывать результаты своего поведения. Результаты компьютерного моделирования сопоставляются с данными биологического эксперимента.

2. Биологический эксперимент. Поведение рыб в лабиринтах

Модель основана на биологическом эксперименте, в котором изучалось поведение рыб данио рерио в незнакомой им среде – лабиринтах двух типов: в простом крестообразном лабиринте с 4-мя коридорами (рис. 1) и в более сложном лабиринте с 11-ю коридорами (рис. 2). Подробное описание биологического эксперимента приведено в [9].

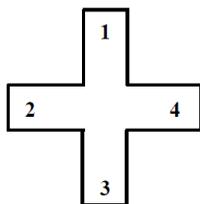


Рис. 1. Крестообразный лабиринт

Значительная часть перемещений рыб между коридорами подчинялась простым правилам. Такие типичные перемещения мы будем называть мотивами:

1. Самый заметный мотив – повторяющиеся челночные переходы между смежными коридорами, например, 12121212 или 141414...

2. Менее частый мотив – повторяющиеся челночные переходы между противоположными коридорами: 131313 и 24242424.
3. Изредка наблюдались последовательные переходы из одного коридора в другой смежный по часовой стрелке (1234) или в противоположном направлении (3214) и переходы с «возвратом», например, 12321 или 14341.

Кроме мотивов, у рыб наблюдаются и такие последовательности посещения коридоров, которые не подчиняются каким-либо явным правилам, например, 231421. Характерный пример последовательности посещаемых рыбой коридоров:

2121212121232323422323232313232323232132312313412341234123423232
323231321431412141214121212341212121212313212121234123432424242413
131312424243121324121412312.

Подчеркнуты цепочки, соответствующие указанным мотивам.

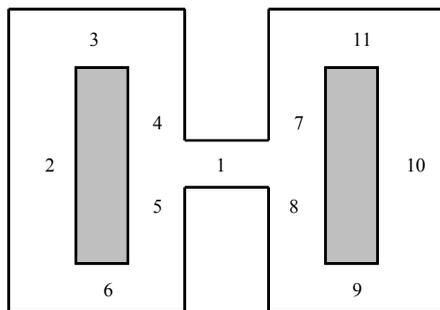


Рис. 2. Лабиринт с 11-ю коридорами. Серым показаны непрозрачные барьеры внутри левого и правого отсеков

В лабиринте с 11-ю коридорами (рис. 2) рыбы были такими же (с теми же размерами), как и в случае крестообразного лабиринта. Описание лабиринта, а также характерные упорядоченные движения рыб можно найти в [9]. Результаты первых исследований рыб в лабиринте с 11-ю коридорами показали, что значительная часть передвижений рыб не была случайной. В поведении рыб наблюдались упорядоченные передвижения, подчиняющиеся определенным правилам. При этом рыба могла постоянно игнорировать один и тот же внешний ориентир (вход в коридор 1) и проходить мимо него при выполнении одной последовательности, но регулярно реагировать на него же и входить в этот коридор при выполнении

другой последовательности.

Помимо упорядоченных передвижений наблюдались и разнообразные передвижения между коридорами, не подчиняющиеся явно каким-либо правилам, например, 6518987...

Подчеркнем, что крестообразный лабиринт и лабиринт с 11-ю коридорами существенно различаются: все коридоры в крестообразном лабиринте видны рыбе после первого ее появления в центре, а коридоры в лабиринте, представленном на рис. 2, заранее рыбе неизвестны.

В настоящей работе построена и исследована модель для простого крестообразного лабиринта и намечены подходы для построения модели для лабиринта с 11 коридорами.

3. Модель предсказаний для движения рыб по крестообразному лабиринту

Была построена компьютерная модель, в которой рассчитывалась уверенность агентов (модельных рыб) в предсказаниях будущих ситуаций. Уверенность характеризовалась величиной, меняющейся от 0 до 1. Время в модели дискретно: $t = 0, 1, 2, \dots$. Модель строилась для простого случая крестообразного лабиринта (рис. 1). Модель предполагала, что имеются исходные ситуации S_t (каждая ситуация соответствует коридору, в котором агент находится, число различных ситуаций равно числу коридоров и равно 4). В каждой ситуации агент может выполнять три действия A_t : при выходе из коридора, агент может 1) повернуть в правый коридор, 2) пройти в противоположный коридор, 3) повернуть в левый коридор. Отметим, что рыбы так редко возвращаются в коридор, из которого только что вышли, что этим действием в модели пренебрегаем. При выполнении действия агент предсказывает, в какой ситуации S_{t+1} он дальше окажется (таких новых ситуаций 4). В некоторой степени это предсказание подобно формированию простого акцептора результата действия в теории функциональных систем П.К. Анохина.

Далее агент определяет, сбылось ли его предсказание. Если предсказание сбылось, то уверенность в данном предсказании увеличивается, если предсказание не сбылось, то такая уверенность уменьшается. Таким образом, формируются уверенности в предсказании конечного элемента цепочки $\{S_t, A_t\} \rightarrow S_{t+1}$. Конечно, в данном простом лабиринте рыбе почти нечего предсказывать, тем не менее, она не уверена до конца, что в том коридоре, в котором она уже несколько раз побывала, не появилось чего-либо нового. Поэтому компьютерная модель содержит естественную ди-

намику уверенностей предсказания.

В модели была введена следующая эвристика. Предполагалось, что когда уверенность агента в текущем предсказании мала (меньше определенного порога Th), агент стремится повторить только что пройденный маршрут, т.е. агент из того коридора, в котором он в данный момент времени t находится, возвращается в тот коридор, в котором он был в предыдущий момент $t-1$. А если уверенность агента в текущем предсказании больше порога Th , то агент совершает случайное действие, для которого уверенность агента в предсказываемом результате, как правило, невелика.

Данная эвристика соответствует отмеченным выше двум противоположным тенденциям: 1) стремлению предсказывать результаты своего поведения (при этом уверенности при правильном предсказании усиливаются), и 2) поиску новой, непредсказуемой ситуации (что соответствует выполнению случайного действия при достижении высокой текущей уверенности).

Множество уверенностей для всех возможных цепочек $\{S_t, A_t\} \rightarrow S_{t+1}$ запоминалось агентом. Кроме того, считалось, что уверенности в предсказании ожидаемого результата для всех цепочек $\{S_t, A_t\} \rightarrow S_{t+1}$ все время немного уменьшаются.

Также предполагалось, что когда агент делает предсказание для данного канала и действия, он предсказывает ожидаемый результат действия в соответствии с имеющимися у него уверенностями такого предсказания: для уверенностей, близких к 1, он однозначно предсказывает результат, а для малых уверенностей, он предсказывает результат вероятностно.

Основные параметры расчета в компьютерной модели были таковы: типичное увеличение/уменьшение уверенности при правильном/неправильном предсказании составляло 0.3, порог Th , с которым сравнивается уверенность предсказания, равен 0.9, характерное время уменьшения всех уверенностей составляло 200 тактов времени.

Характерный пример последовательности посещаемых агентом коридоров таков:

43434342424243414141212121243413131313121232323232313123234343
431313121232434343131414141414242424221212121313131314143434343
23232323212121232323.

Как и для реальных рыб (см. изложение результатов биологического эксперимента выше), подчеркнуты цепочки, соответствующие отмеченным выше мотивам. Видно, что последовательности посещаемых коридоров для модельных агентов и для реальных рыб аналогичны друг другу. Для агентов не встречаются только редкие для рыб цепочки движения «по

кругу», такие как 1234. По-видимому, этот редко встречающийся у рыб мотив можно учесть и для агентов, вводя дополнительную эвристику, специфичную для ряда животных: преимущественное перемещение вдоль выбранной стенки.

В компьютерной модели несложно проследить динамику суммарной уверенности агента A_S в предсказании для всего лабиринта, суммируя уверенность для всех возможных цепочек $\{S_t, A_t\} \rightarrow S_{t+1}$. Зависимость от времени t суммарной уверенности в предсказаниях для всего лабиринта показана на рис. 3. В начале расчета уверенность для всех возможных предсказаний агента была равна 0. В дальнейшем уверенность растет. Для каждого коридора и каждого действия только одно предсказание будущей ситуации является правильным. Поэтому максимально возможное число правильных предсказаний равно суммарной уверенности для всего лабиринта. С учетом числа коридоров и действий для всех возможных цепочек $\{S_t, A_t\} \rightarrow S_{t+1}$ это число равно $4 \cdot 3 = 12$. Это максимально возможное значение суммарной уверенности в предсказаниях не достигается из-за того, что все уверенности постоянно немного уменьшаются. После достижения определенного уровня суммарная уверенность выходит на насыщение и случайно колеблется (рис. 3).

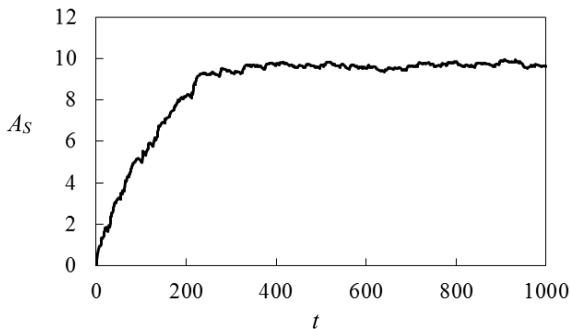


Рис. 3. Зависимость суммарной уверенности агента в предсказаниях для всего лабиринта от времени

Результаты компьютерной модели качественно согласуются с экспериментальными биологическими данными: качественно подобны последовательности посещаемых коридоров и цепочки, соответствующие мотивам перемещения по смежным коридорам и перемещения по противо-

положным коридорам. Также зависимость суммарной уверенности агента в предсказаниях для всего лабиринта от времени согласуется с представлением о том, какой должна быть эта зависимость у рыб.

Таким образом, построена модель усовершенствования уверенностей рыб в будущих событиях для крестообразного лабиринта. Для лабиринта с 11-ю коридорами также можно построить аналогичную модель следующим образом.

Считаем, что имеется две стадии познания лабиринта. На первой стадии агенты (модельные рыбы) познают общие черты лабиринта, при этом знания обо всех проходимых ими коридорах увеличиваются. Такой процесс накопления знаний обо всех коридорах моделировался в нашей предыдущей работе [9]. В результате первой стадии агент знает достаточно обо всех коридорах.

На второй стадии для текущей ситуации и текущего действия агента формируются предсказания в будущих ситуациях, аналогично тому, как это происходит в изложенной выше модели для крестообразного лабиринта. Ситуации при этом соответствуют коридору, в котором агент находится, и той развилке коридора, в которой расположен в текущий такт времени. Например, агент может находиться в самой верхней точке коридора 2 или в самой правой точке коридора 1 (в последнем случае агент может дальше переместиться в коридоры 7 или 8). То есть, число возможных ситуаций S_t возрастает по сравнению с крестообразным лабиринтом. А действия A_t остаются такими же: пойти направо/налево или пойти прямо. В итоге агент должен формировать уверенности в предсказаниях конечных элементов цепочек: $\{S_t, A_t\} \rightarrow S_{t+1}$.

Существенное различие для двух лабиринтов – крестообразного лабиринта и лабиринта с 11-ю коридорами – состоит в том, что в крестообразном лабиринте рыбы с самого начала, зайдя в центр лабиринта, могут видеть все коридоры. А для лабиринта с 11-ю коридорами рыбы должны предварительно получить начальные знания обо всех коридорах – для этого и целесообразно ввести в модель первую стадию для такого более сложного лабиринта.

6. Заключение

Поведение рыб в крестообразном лабиринте характеризуется такими важными понятиями, как модель и предсказание. В научном познании также формируются модели внешнего мира и делаются предсказания на основе этих моделей [10, 11]. Конечно, уверенность рыб основана на про-

стом индуктивном обобщении опыта, а уверенность ученого в предсказаниях при построении модели (например, модели механики И. Ньютона) формируется на базе сопоставления многих фактов, концепций и теорий. И различие между творческим процессом познания природы человеком и предпосылками этих процессов у рыб огромно. Пока видны только важные общие черты этих процессов.

Список литературы

1. Непомнящих В.А. Адаптация к решению частных задач и «глобальные» цели в поведении животных // *Нейроинформатика (электронный журнал)*. 2012. Т. 6. № 1. С. 12–22.
URL: <http://www.niisi.ru/iont/ni/Journal/V6/N1/Nepomnyashchikh.pdf>
2. Непомнящих В.А. Адаптация и автономия в поведении животных // XV Всероссийская научно-техническая конференция «Нейроинформатика–2013»: Лекции по нейроинформатике. М.: НИЯУ МИФИ, 2013. С. 106–123.
3. Непомнящих В.А. Связь между автономным и адаптивным поведением у искусственных агентов и животных // *Подходы к моделированию мышления* (Под ред. Редько В.Г.). М.: УРСС, 2014. С. 9–28.
4. Inglis I.R., Langton S., Forkman B., Lazarus J. An information primacy model of exploratory and foraging behaviour // *Animal Behaviour*. 2001. V. 62. No. 3. PP. 543–557.
5. Inglis I.R., Forkman B., Lazarus J. Free food or earned food: a review and fuzzy model of contrafreeloading // *Animal Behaviour*. 1997. V. 53. No. 6. PP. 1171–1191.
6. Жданов А.А. Автономный искусственный интеллект. М.: Бином, 2008.
7. Oudeyer P.-Y., Kaplan F. Intelligent adaptive curiosity: a source of self-development // *Proceedings of the 4th International Workshop on Epigenetic Robotics* (Eds. Berthouze L. et al.). Lund University Cognitive Studies, 2004. V. 117. PP. 127–130.
8. Oudeyer P.-Y., Kaplan F. What is intrinsic motivation? A typology of computational approaches // *Frontiers in Neurorobotics*. 2009. V. 1. Article 6. URL: <http://journal.frontiersin.org/Journal/10.3389/neuro.12.006.2007/full>
9. Непомнящих В.А., Осипова Е.А., Редько В.Г. и др. Модель навигации животных в лабиринтах. XVI Всероссийская научно-техническая конференция «Нейроинформатика-2014» с международным участием. Сборник научных трудов. Ч. 1. М.: НИЯУ МИФИ, 2014. С. 109-117.
10. Редько В.Г. Эволюция, нейронные сети, интеллект. Модели и концепции эволюционной кибернетики. М.: УРСС, 2005.
11. Турчин В.Ф. Феномен науки. Кибернетический подход к эволюции. М.: Наука, 1993. См. также: <http://www.refal.ru/turchin/phenomenon/>