

# НЕПОМНЯЩИХ В.А.<sup>1)</sup>, ОСИПОВА Е.А.<sup>1)</sup>, РЕДЬКО В.Г.<sup>2)</sup>, ШАРИПОВА Т.И.<sup>2)</sup>, БЕСХЛЕБНОВА Г.А.<sup>2)</sup>

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

<sup>2)</sup> Научно-исследовательский институт системных исследований РАН,  
Москва

## МОДЕЛЬ НАВИГАЦИИ ЖИВОТНЫХ В ЛАБИРИНТАХ

Настоящая модель служит для понимания поискового поведения животных, в котором животное не только ведет поиск, направленный на удовлетворение той или иной потребности, но и стремится к исследованию внешней среды. Кратко изложены результаты биологического эксперимента по навигации рыб в лабиринтах. Проведено компьютерное моделирование такой навигации.

*Ключевые слова:* моделирование поведения животного, исследовательское поведение, навигация в лабиринте

### 1. Введение

Как подчеркивается в работе [1], в поведении животных постоянно присутствуют две противоположные тенденции, не связанные непосредственно с физиологическими потребностями. Одна из них – поиск новой, непредсказуемой стимуляции, а другая – стремление предсказывать результаты своего поведения.

Первоначальные модели поведения животных основывались на предположении, что поведение животного направлено на достижение максимальной выгоды при минимуме затрат времени и энергии, например, при необходимости выбора участка с кормом предпочтение отдается тому участку, где корма больше или его легче собрать [2,3]. Однако было замечено, что если животное сыто (пищевая мотивация не слишком высока), то в его поведении присутствует стремление найти новые объекты или обнаружить новые свойства у известных предметов. Для объяснения такого поведения была выдвинута гипотеза «уменьшения неопределенности» [4,5], которая предполагает наличие у животного постоянной мотивации к сбору информации о среде. Эта мотивация преобладает, если основные потребности (например, в пище) удовлетворены. Тогда поведение животного, стимулируемого мотивацией к сбору информации об окружающей среде, приводит к уменьшению неопределенности. Если же животное

сильно голодно и видит пищу, то исследовательское поведение отсутствует [6].

В поведении животных наряду с поиском новизны можно выделить также и стремление к предсказуемости результатов своих действий, что дает им возможность контролировать окружающую среду, см., например [7]. Эти две тенденции (новизна и предсказуемость) в поведении животных являются на первый взгляд противоречащими друг другу. Реально мы сталкиваемся с тем, что между новизной и предсказуемостью складывается определенный баланс [8]. Взаимодействие этих двух тенденций приводит к тому, что животное постоянно исследует последствия своих действий и незнакомые объекты во внешней среде, даже если они не связаны с удовлетворением физиологических потребностей организма.

Отметим, что полученные представления о балансе новизны и предсказуемости в поведении животных были успешно реализованы в программах управления робота – «собаки» Aibo [9, 10].

В настоящей работе строятся основанные на биологическом эксперименте модели навигации рыб данио рерио в двух типах лабиринтов.

## 2. Биологический эксперимент

Модель основана на биологическом эксперименте, в котором изучалось поведение рыб данио рерио в незнакомой им среде – лабиринтах двух типов: простой крестообразный лабиринт с 4-мя коридорами (рис. 1) и более сложный лабиринт с 11-ю коридорами (рис. 2).

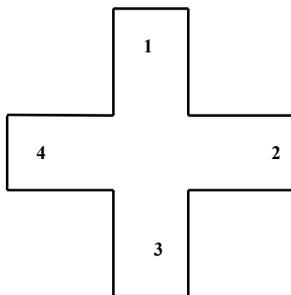


Рис. 1. Крестообразный лабиринт

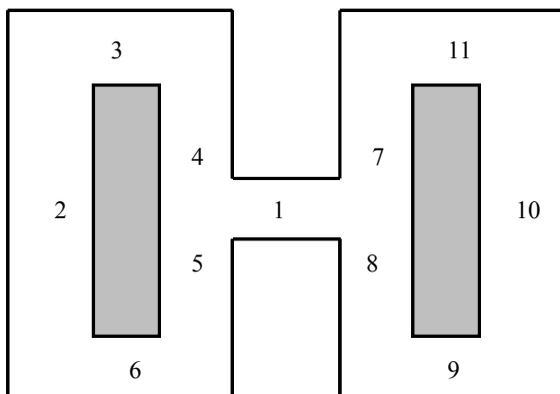


Рис. 2. Лабиринт с 11-ю коридорами. Серым показаны непрозрачные барьеры внутри левого и правого отсеков

### 2.1. Поведение рыб в крестообразном лабиринте

Наиболее подробно исследовалось поведение рыб в крестообразном лабиринте. Размеры лабиринта составляли: длина коридора (от входа в коридор из центра до торца): 65 мм, ширина коридора: 33 мм, центр (квадрат между входами в коридоры): 33x33 мм, высота стенок лабиринта: 48 мм, уровень воды в лабиринте 38 мм. Типичная длина рыб составляла 25 мм. Основные результаты биологического эксперимента сводятся к следующему. Наблюдали 20 самцов данио рерио. Каждого самца по отдельности помещали в один из коридоров и закрывали заслонкой выход из него на 2 мин, а потом заслонку убирали и вели съемку 15 мин. Ниже характеризуются основные виды перемещения рыб, нумерация коридоров показана на рис. 1. Значительная часть перемещений рыб между коридорами подчинялась простым правилам. Такие перемещения мы будем называть мотивами:

1. Самый заметный мотив – повторяющиеся челночные переходы между смежными коридорами, например, 12121212 или 141414...
2. Менее частый – 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 противополож-

ном направлении (3214) и переходы с «возвратом», например, 12321 или 14341.

Мотивы типа 1 и 2 считались таковыми только, если переходы между коридорами туда и обратно повторялись не менее двух раз, т.е., например, 2323, но не 232; 2424, но не 424.

Кроме мотивов, у рыб наблюдаются и такие последовательности посещения коридоров, которые не подчиняются каким-либо правилам, случайные, например 231421.

## **2.2. Поведение рыб в лабиринте с 11-ю коридорами**

В лабиринте с 11-ю коридорами (рис. 2) длина коридоров 2 и 10 составляла 110 мм, коридоров 3, 6, 9 и 11 – 60 мм, коридоров 4, 5, 7 и 8 – 45 мм. Длина коридора 1 – 30 мм. Ширина каждого коридора – 20 мм. Рыбы были такими же (с теми же размерами), как и в случае крестообразного лабиринта.

Результаты первых исследований рыб в лабиринте с 11-ю коридорами показали, что значительная часть передвижений рыб не была случайной. Наблюдались следующие упорядоченные передвижения:

1. челночные перемещения в противоположных направлениях вдоль какого-либо из коридоров 2, 3, 6, 9, 10, 11 (но не 1). Достигнув конца коридора, рыба разворачивалась, доходила до противоположного конца, снова разворачивалась и т.д.
2. челночные передвижения, включающие два смежных коридора, например, 232323...
3. передвижения вдоль коридоров 4 и 5 или 7 и 8. В этих случаях рыба переходила, например, из коридора 4 в коридор 5, поворачивала в конце последнего, возвращалась в коридор 4 и т.д.: 454545454.... При таких передвижениях вход в коридор 1 игнорировался.
4. передвижения 417141714... и 5181518..., в которых рыба поворачивала в коридор 1 всегда, когда проходила мимо него.
5. обход какого-либо отсека по периметру, например, 2345623456....

Таким образом, в поведении рыб наблюдаются упорядоченные передвижения, подчиняющиеся определенным правилам. При этом рыба может постоянно игнорировать один и тот же внешний ориентир (вход в коридор 1) при выполнении одной последовательности, но регулярно реагировать на него же 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 связи с различием лабиринтов различаются и модели для этих лабиринтов.

### 3. Модель движения рыб по крестообразному лабиринту

В модели считалось, что имеются только основные мотивы, соответствующие пп. 1,2 раздела 2.1: тип 1, т.е. 4 мотива движения между смежными коридорами и тип 2, т.е. 2 мотива движения между противоположными коридорами (всего 6 мотивов). Также учитывалась возможность случайного выбора того или иного варианта движения.

Вводились следующие параметры модели: вероятности переходов между мотивами рассматриваемых типов для каждого такта времени  $P_{ij}$ ,  $i, j = 1, 2$ . Например,  $P_{12}$  – вероятность перехода между мотивами первого и второго типов. Также вводились вероятности выбора случайного движения и выбора того или иного мотива (если до этого движение происходило без мотива),  $P_{00}, P_{01}, P_{02}$ , а также вероятности перехода от движения в соответствии с мотивами к выбору случайного движения  $P_{10}$  и  $P_{20}$ . Естественно, что налагались ограничения:  $P_{00} + P_{01} + P_{02} = 1$ ,  $P_{10} + P_{11} + P_{12} = 1$ ,  $P_{20} + P_{21} + P_{22} = 1$ . При этом считается, что с вероятностями  $P_{11}$  и  $P_{22}$  мотив не меняется (переходами от мотива первого типа к другому мотиву того же типа пренебрегаем, считаем, что такой переход осуществляется через случайный выбор движения). Переход к определенному мотиву типа 1 или 2 считался случайным.

Было проведено компьютерное моделирование согласно изложенной модели. При моделировании полагалось, что вероятности переходов между случайным движением и мотивами первого и второго типов составляют:  $P_{00} = 0.4$ ,  $P_{01} = 0.4$ ,  $P_{02} = 0.2$ ;  $P_{10} = 0.1$ ,  $P_{11} = 0.8$ ,  $P_{12} = 0.1$ ;  $P_{20} = 0.2$ ,  $P_{21} = 0.6$ ,  $P_{22} = 0.2$ .

Моделирование продемонстрировало, что навигация модельных рыб качественно подобна поведению реальных рыб. В компьютерных экспериментах наблюдалось повторяющиеся челночные переходы между смежными коридорами, что соответствует мотиву первого типа. Изредка наблюдались и повторяющиеся челночные переходы между противоположными коридорами, что соответствует мотиву второго типа.

#### 4. Модель движения рыб по лабиринту с 11-ю коридорами

Для лабиринта с 11-ю коридорами (рис. 2) также была построена компьютерная модель, в которой предполагалось, что каждый из коридоров характеризуется степенью знания о нем  $C_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, 11$ . Считалось, что знания  $C_i$  могут увеличиваться при прохождении рыбы по коридору: если рыба проплыла весь  $i$ -й коридор, то величина  $C_i$  после этого увеличивается на  $\Delta C$ . Также считаем, что величины  $C_i$  ограничены:  $0 \leq C_i \leq 1$ . Перед началом эксперимента у рыбы знания обо всех коридорах нулевые:  $C_i = 0$ . Также формально полагаем, что если какая-либо величина  $C_i$  в результате добавления  $\Delta C$  превысила 1, то она становится равной 1.

В общем случае можно считать, что вероятность перехода из коридора с номером  $i$  в коридор с номером  $j$ , зависит от величин  $C_i$  и  $C_j$ . В настоящей работе мы строим модель в следующем приближении: считаем, что если рыба дошла до конца какого-либо коридора, для которого величина  $C_i$  в результате прохождения этого коридора превысила порог  $Th$ , то рыба переходит в следующий коридор. Например, если рыба прошла коридор 2 вверх, и  $C_2$  стало больше  $Th$ , то рыба переходит в коридор 3. Также считаем, что если рыба дошла до развилки, в которой возможны два пути, то она с большей вероятностью  $P_s$  выбирает смежный с предыдущим коридор, чем путь прямо, в противоположный коридор, который она выбирает с вероятностью  $P_f$ . Например, если рыба прошла коридор 7 вниз, и  $C_7$  стало больше  $Th$ , то рыба с вероятностью  $P_s$  переходит в коридор 1, а с вероятностью  $P_f$  в коридор 8. Кроме этого, вводим аналогичные вероятности для переходов к той же стенке, вдоль которой рыба двигалась до этого (эта вероятность равна  $P_w$ ), и к противоположной стенке (эта вероятность равна  $P_u$ ). В лабиринте, представленном на рис. 2, это возможно только во время выхода из коридора 1. Так, если рыба до коридора 1 шла по коридору 4, то после выхода из коридора 1 она предпочтительно (с вероятностью  $P_w$ ) перейдет в коридор 7 (вдоль той же стенки, что и раньше), и менее вероятно (с вероятностью  $P_u$ ) в коридор 8 (к противоположной стенке). Дополнительно будем считать, что коридор 1 имеет малые по сравнению с другими коридорами размеры, поэтому рыба сразу весь его видит, поэтому считаем, что после первого попадания рыба в этот коридор, всегда  $C_1 = 1$ .

Приведенные параметры считались следующими:  $\Delta C = 0.3$ ,  $Th = 0.8$  (это означает, что для того, чтобы как следует познакомиться с коридором, рыбе достаточно пройти его 3 раза),  $P_s = 0.7$ ,  $P_f = 0.3$ ,  $P_w = 0.8$ ,  $P_u = 0.2$ .

Моделирование продемонстрировало качественное подобие движения модельных «рыб» их биологическим прототипам. Как и в биологическом эксперименте наблюдались челночные перемещения по отдельным коридорам, а также челночные перемещения по смежным коридорам, например, перемещения 10, 11, 10, 11. В компьютерных расчетах четко наблюдался довольно быстрый рост знаний модельных рыб о лабиринте (рис. 3). Один такт времени на рис. 3 соответствовал времени прохождения рыб по одному каналу. Видно, что после начального блуждания модельные рыбы полностью изучают лабиринт, их знания становятся максимально возможными:  $C = 1$ .

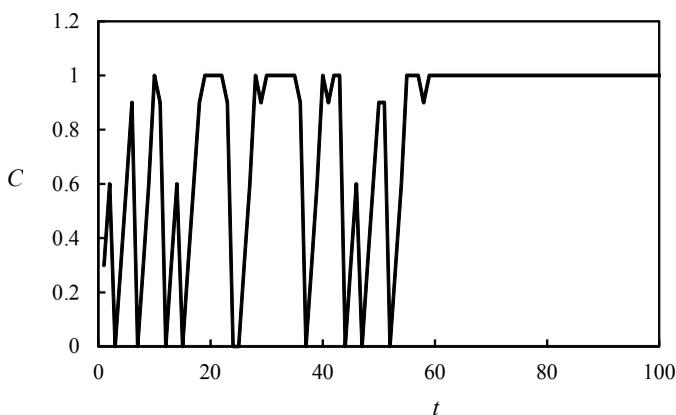


Рис. 3. Зависимость знания  $C$  модельной «рыбы» о проходимом ей коридоре от времени  $t$

### 5. Заключение

Итак, построены модели навигации рыб в лабиринтах и получено качественное согласие результатов моделирования с биологическим экспериментом. Эта работа только начата, поэтому необходимо более детальное сопоставление эксперимента и моделирования. Также целесообразно исследование влияния вариации параметров моделей на навигацию модельных рыб. Например, в модели можно учесть медленное забывание знаний о коридорах, т.е. полагать, что каждый такт времени все величины  $C_i$  умножаются на величину  $k_r$ , немного меньшую 1:  $0 < k_r < 1$ ,  $1 - k_r \ll 1$ .

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

*Список литературы*

1. Непомнящих В.А. Адаптация и автономия в поведении животных // XV Всероссийская научно-техническая конференция «Нейроинформатика-2013»: Лекция по нейроинформатике. – М.: НИЯУ МИФИ, 2013. С. 106-123.
2. Stephens, D.W. and J.R. Krebs 1986. *Foraging theory*. Princeton University Press, Princeton, NJ. 247 pp
3. Charnov, E. L. (1976). Optimal Foraging, the Marginal Value Theorem. // *Theoretical Population Biology*, vol. 9, pp. 129-136.
4. Inglis, I.R., Langton, S., Forkman, B & Lazarus, J 2001, An information primacy model of exploratory and foraging behavior // *Animal Behaviour*, vol. 62, 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*, vol. 53, no. 6, 1997 June, pp. 1171-1191.
6. Inglis I. R., Langton S., Forkman B. Lazarus, J. 2001. An information primacy model of exploratory and foraging behavior // *Animal Behavior*, vol. 62, pp. 543–557.
7. Kavanau J. L. 1963. Compulsory regime and control of environment in animal behaviour. I. Wheelrunning // *Behaviour*, vol. 20, pp. 251–281.
8. Benjamini Y., Fonio E., Galili T., Havkin G. Z., Golani I. 2011. Quantifying the buildup in extent and complexity of free exploration in mice // *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, vol. 108: Supplement 3, pp. 15580–15587.
9. Oudeyer P.-Y., Kaplan F. 2004. 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 117: 127–130.
10. Oudeyer P.-Y., Kaplan F. 2007. What is intrinsic motivation? A typology of computational approaches // *Frontiers in Neurorobotics*, vol. 1: Article 6, 1–14. [www.frontiersin.org](http://www.frontiersin.org)