

Моделирование когнитивной ЭВОЛЮЦИИ

НИИ системных исследований РАН

**Редько Владимир Георгиевич
vgredko@gmail.com**

Две части лекции

1. **Моделирование когнитивной эволюции – формирующееся научное направление**
2. **Нерешенные проблемы:** предложения исследований для молодых специалистов

План

- 1. Предпосылки моделирования когнитивной эволюции**
- 2. Заделы исследований когнитивной эволюции: модели автономных агентов**
- 3. Биологические эксперименты по элементарному мышлению животных**
- 5. Начальные шаги моделирования когнитивной эволюции**
 - 5.1. Модели поискового поведения рыб**
 - 5.2. Модели когнитивных свойств новокаледонских ворон**
- 6. Нерешенные проблемы:**
 - 6.1. Модель автономного агента, познающего законы природы**
 - 6.2. Модели гениальных птиц (по фильму «Клюв и мозг»)**

Основной сюжет

Будут рассмотрены перспективы моделирования когнитивной эволюции, т.е. эволюции познавательных способностей биологических организмов, в результате которой произошло логическое мышление человека, используемое в научном познании

Важный тезис

**Наиболее серьезные когнитивные процессы –
это процессы научного познания**

Гносеологическая проблема: почему логический вывод, сделанный человеком, можно использовать в познании природы?

Математики доказывают теоремы. Делается это формальным логическим путем, казалось бы совсем независимо от реальной физической природы.

Математика эффективно применяется в физике. Почему результаты, полученные формальным логическим путем, применимы к физическим объектам в природе?

Почему математика применима к физике?

Кто думал над такими вопросами

Иммануил Кант – провел исследование познавательных процессов в приближении фиксированного мышления взрослого человека («Критика чистого разума», 1781 г.)

Конрад Лоренц – от кантовской доктрины априорного к эволюционной теории познания (1941 г.)

Может ли человек познавать законы природы?

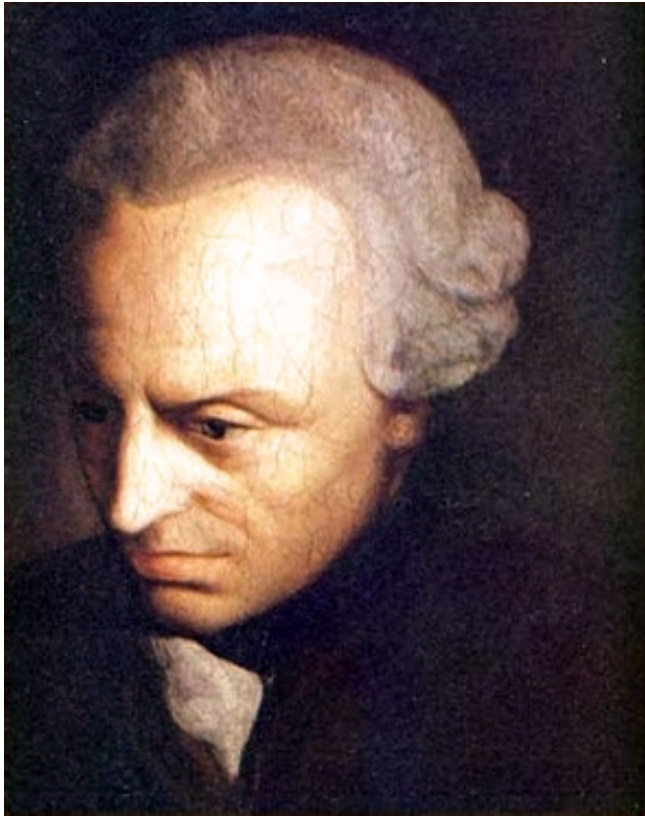
«...хотя вначале это звучит странно, но тем не менее верно, если я скажу: *рассудок не черпает свои законы (a priori) из природы, а предписывает их ей*»

И. Кант. Прологомены ко всякой будущей метафизике, могущей появиться как наука, 1783 г.

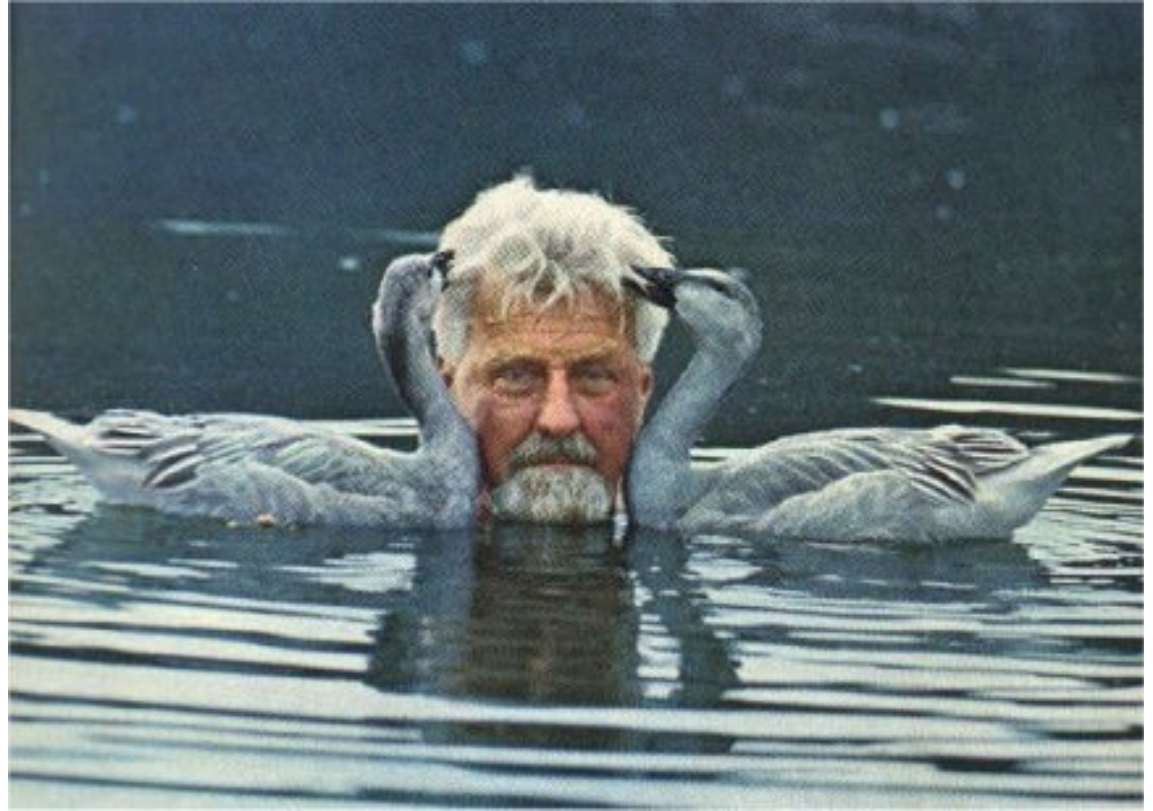
«Не были бы законы разума, необходимые для априорного мышления, иными, если бы они сформировались иным историческим способом и если бы мы, следовательно, были оснащены иным типом нервной системы?»

И вообще, возможно ли, чтобы законы нашего когнитивного аппарата не были связаны с законами реального внешнего мира?»

К. Лоренц. Кантовская доктрина априорного в свете современной биологии, 1941 г.



Иммануил Кант
1724-1804



Конрад Лоренц
1903-1989

Конрад Лоренц и его гусята



Подход к исследованию гносеологической проблемы

Исследовать происхождение логического мышления, интеллекта человека путем построения математических и компьютерных моделей когнитивной эволюции.

Проследить весь путь биологической эволюции от простейших до человека, анализируя с помощью моделей, как на этом пути возникали способности познания закономерностей природы.

**Заделы исследований
КОГНИТИВНОЙ ЭВОЛЮЦИИ: МОДЕЛИ
АВТОНОМНЫХ КОГНИТИВНЫХ АГЕНТОВ**

АДАПТИВНОЕ ПОВЕДЕНИЕ

- **Первая конференция: Париж, 1990 г. (Ж.-А. Мейер, С. Вильсон)**
- **Основной подход – конструирование и исследование искусственных (в виде компьютерной программы или робота) «организмов» (аниматов, агентов), способных приспосабливаться к внешней среде**
- **ANIMAL + ROBOT = ANIMAT**
- **Программа-минимум – исследовать архитектуры и принципы функционирования, которые позволяют животным или роботам жить и действовать в переменной внешней среде**
- **Программа-максимум – попытаться проанализировать эволюцию когнитивных (познавательных) способностей животных и эволюционное происхождение человеческого интеллекта**
- **Предшественники: М.Л. Цетлин, М.М. Бонгард. Гаазе-Рапопорт М.Г., Поспелов Д.А. От амебы до робота: модели поведения. М.: Наука, 1987. М.: УРСС, 2004, 2011.**

Искусственная жизнь

Направление исследований «Искусственная жизнь» сформировалось в конце 1980-х годов. **Основной мотивацией исследований искусственной жизни служит желание понять и промоделировать формальные принципы организации биологической жизни.**

Сторонники направления «Искусственная жизнь» часто считают, что они исследуют более общие формы жизни, чем те, которые существуют на Земле.

Т.е. изучается жизнь, какой она могла бы в принципе быть (“life-as-it-could-be”), а не обязательно та жизнь, какой мы ее знаем (“life-as-we-know-it”).

Когнитивные архитектуры

Под когнитивными архитектурами понимаются архитектуры и принципы функционирования познающих систем, которые можно использовать в искусственном интеллекте

Laird L.E. The Soar Cognitive Architecture. Cambridge et al.: The MIT Press, 2012.

Newel A. Unified Theory of Cognition, Cambridge, 1990

SOAR (State, Operator And Result)

<http://sitemaker.umich.edu/soar/home>

Самсонович А.В. Biologically Inspired Cognitive Architectures (BICA).

Журнал “Biologically Inspired Cognitive Architectures”

Международные конференции BICA с 2010 года.

АВТОНОМНЫЕ АГЕНТЫ

Автономные агенты – модельные организмы, имеющие свою собственную систему управления.

Автономные агенты вполне могут рассматриваться как объединяющее понятие для отмеченных направлений.

Работы по автономным агентам ведутся как со стороны биологических наук, так со стороны вычислительных наук.

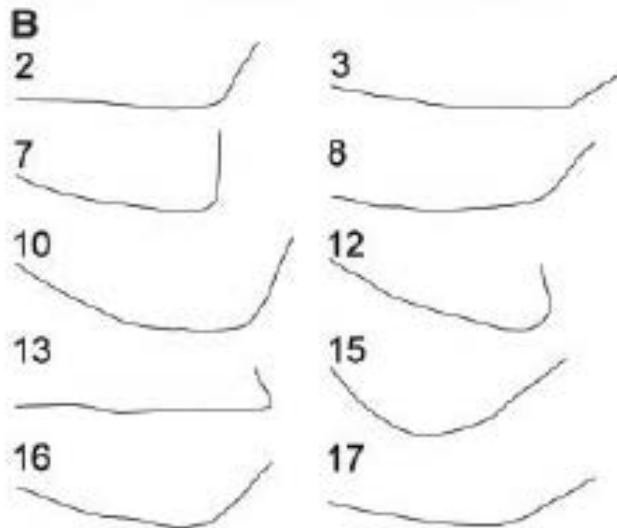
Vernon D., Metta G., Sandini G. A survey of artificial cognitive systems: Implications for the autonomous development of mental capabilities in computational agents // IEEE Transactions on Evolutionary Computation, special issue on Autonomous Mental Development, 2007. V. 11. No. 2. P. 151-180.

**Биологические эксперименты
по элементарному мышлению
животных**

Новокаледонские вороны могут **изобретать** **способ изготовления орудий труда**



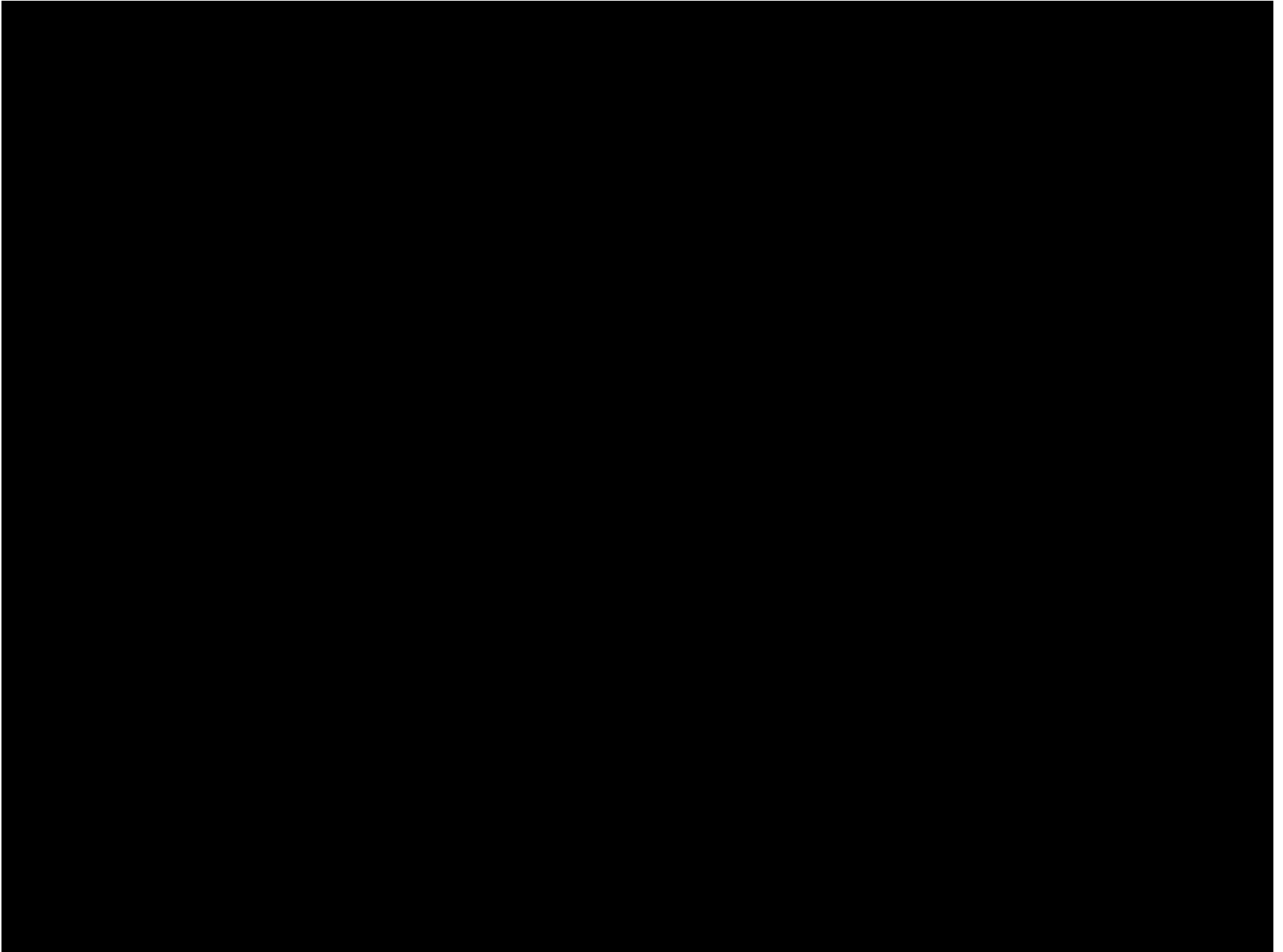
Двум воронам (молодой самке и самцу постарше) предлагали добывать ведро с пищей прямой проволокой и проволокой, согнутой крючком. Вороны сразу поняли, что ведро можно вытащить с помощью крючка.



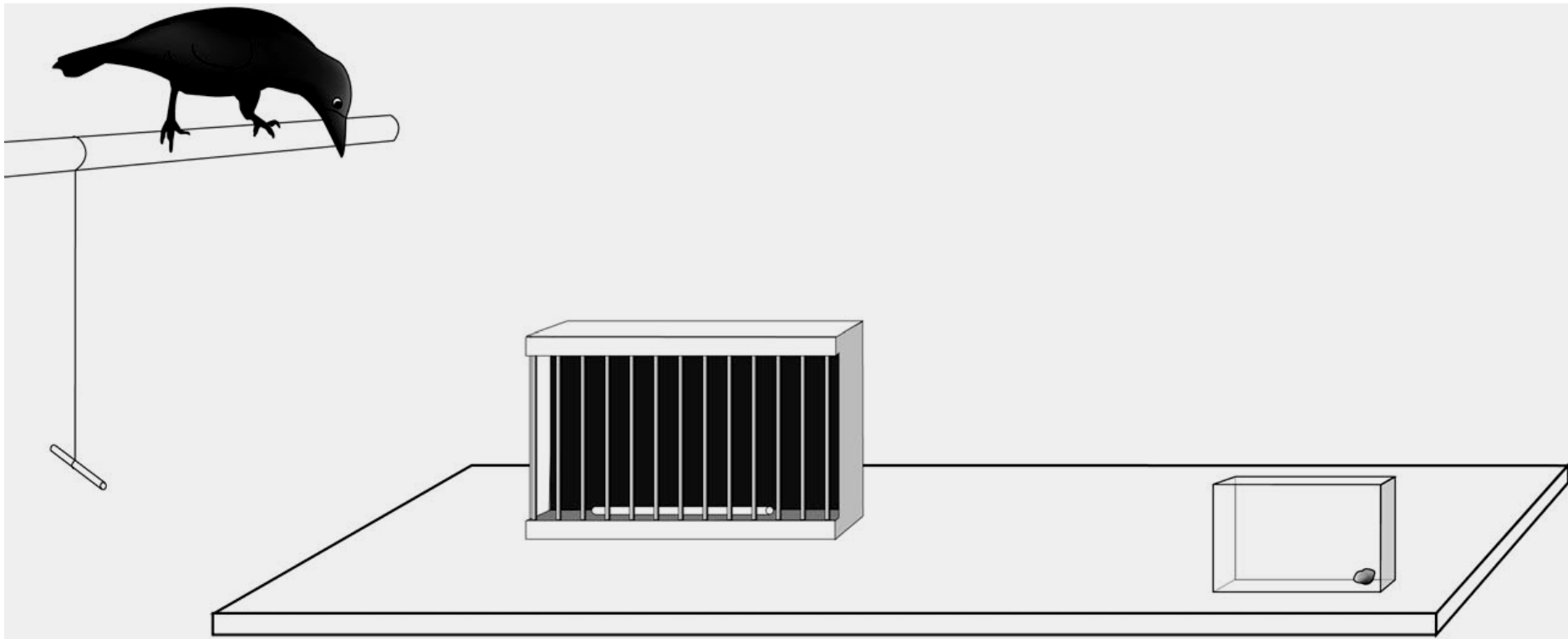
Однажды самец утащил крючок. Тогда самка научилась делать из прямой проволоки крючок, зажимая один конец проволоки в щели и загибая проволоку.

Weir A.A.S., Chappell J., Kacelnik A.
Science. 2002. V. 297. P. 981-983

Новокаледонские вороны могут изобретать способ изготовления орудий труда



Вороны мысленно составляют планы цепочек целенаправленных действий



Taylor A.H., Elliffe D., Hunt G.R., Gray R.D. Proc. R. Soc. B. 2010. V. 277. P. 2637-2643.

Действия: 1) Подтянуть шнуром маленькую палочку. 2) Маленькой палочкой достать длинную. 3) Длинной палочкой достать пищу.

Результаты составления плана воронами

	trial									
crow	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Sam (I)	Green	Green	Green	Orange	Green	Green	Green	Green	Green	Green
Caspar (I)	Light Green	Green	Green	Green	Green	Light Green	Green	Green	Green	Light Green
Maya (I)	Blue	Blue	Orange	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
Djinn (I)	Cyan	Blue	Blue	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Orange
Lazlo (C)	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
Chocho (C)	Green	Green	Light Green	Light Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
Korben (C)	Green	Light Green	Green	Green	Green	Light Green	Green	Green	Green	Green

3 вороны, имевшие опыт со всеми действиями отдельно, сразу решают задачу. 4 вороны, имевшие опыт с частью действий, решают задачу, но не всегда сразу. **Зеленый цвет – решение находится, синий – не находится, оранжевый – находится при малых поисковых вариациях**

Контурь программы будущих исследований когнитивной эволюции

- Исследование моделей адаптивного поведения агентов с несколькими естественными потребностями: питания, размножения, безопасности
- Исследование перехода от физического уровня обработки информации в нервной системе животных к уровню **обобщенных образов**, уровню **понятий** (аналогов слов)
- Исследование процессов формирования **причинной связи** в памяти животных. Анализ роли прогнозов, предсказаний в адаптивном поведении
- Исследование процессов формирования **логических выводов в «сознании» животных**
 $\{УС, УС \rightarrow БС\} \Rightarrow БС$

Начальные шаги моделирования КОГНИТИВНОЙ ЭВОЛЮЦИИ, первые модели

- **Модель автономных агентов (модельных организмов) с потребностями питания, безопасности, размножения.**

Коваль А.Г. Редько В.Г. Поведение модельных организмов, обладающих естественными потребностями и мотивациями // Математическая биология и биоинформатика. 2012. Т. 7. № 1. С. 266–273. URL: [http://www.matbio.org/2012/Koval2012\(7_266\).pdf](http://www.matbio.org/2012/Koval2012(7_266).pdf)

- **Модель формирования эвристик и обобщенных понятий у агента, ведущего поиск пищи в двумерной клеточной среде.**

Бесхлебнова Г.А., Редько В.Г. Модель формирования обобщенных понятий автономными агентами // Четвертая международная конференция по когнитивной науке: Тезисы докладов: Томск: ТГУ, 2010. Т. 1. С. 174–175.

Начальные шаги моделирования КОГНИТИВНОЙ ЭВОЛЮЦИИ, первые модели

➤ Модели когнитивных способностей рыб, осваивающих лабиринты

Red'ko V.G., Nepomnyashchikh V.A., Osipova E.A. Models of fish exploratory behavior in mazes // Biologically Inspired Cognitive Architectures. 2015. Vol. 13. P. 9–16. URL: <https://www.niisi.ru/iont/ni/rvgspubl/Redkoetal2015.pdf>

➤ Компьютерная модель планирования новокаледонскими воронами

Red'ko V.G., Nepomnyashchikh V.A. Model of plan formation by New Caledonian crows // Procedia Computer Science. 2015. Vol. 71. P. 248–253. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/18770509/71>

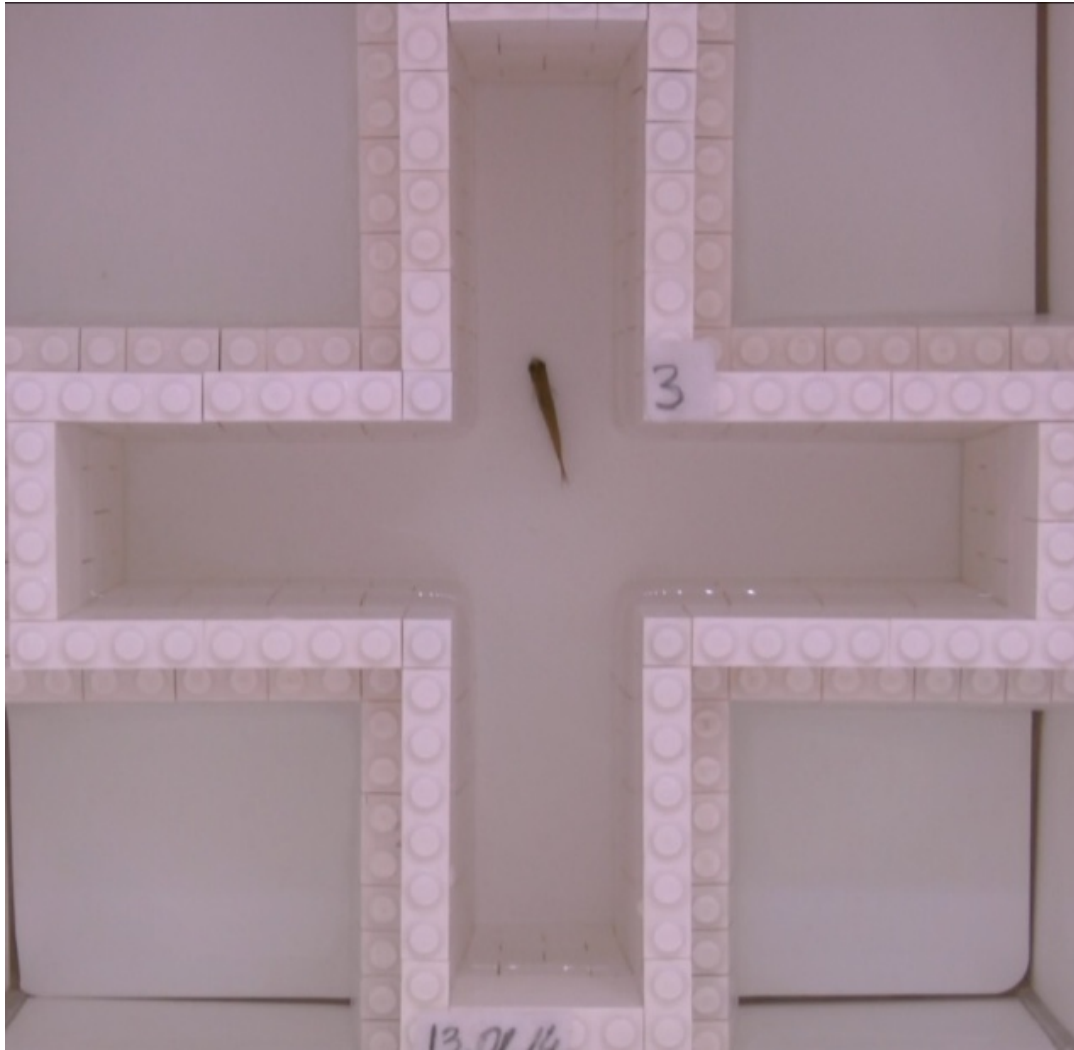
Модели познавательных способностей рыб, изучающих лабиринты

**Редько В.Г.¹⁾, Непомнящих В.А.²⁾, Осипова Е.А.²⁾,
Шарипова Т.И.¹⁾, Бесхлебнова Г.А.¹⁾**

1) НИИ системных исследований РАН, Москва

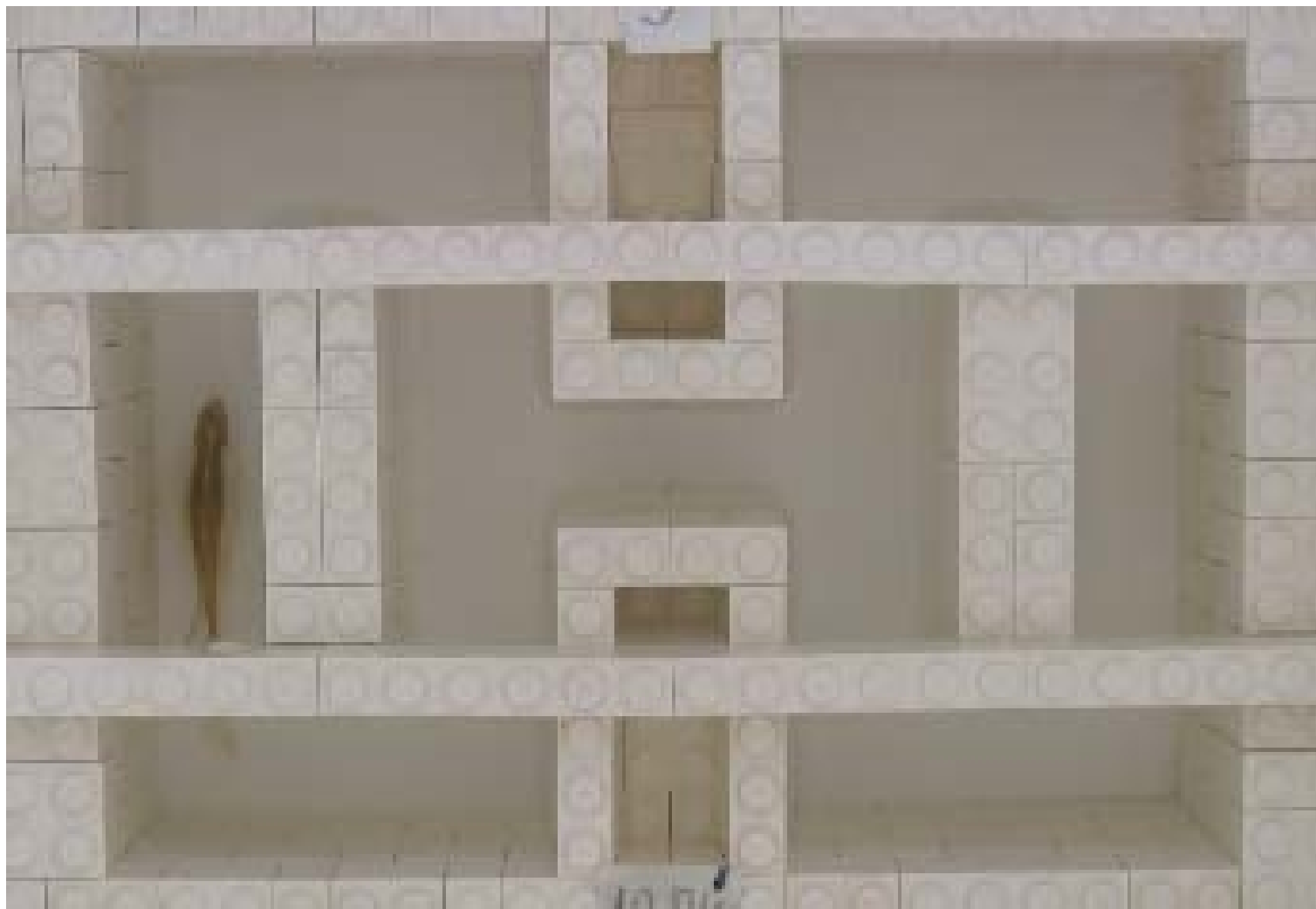
**2) Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина
РАН, Борок, Ярославской обл.**

Биологический эксперимент



**Изучалось поведение
рыб данио рерио,
перемещающихся в
простом
крестообразном
лабиринте без пищи**

Лабиринт с 11 коридорами



Модели исследовательского поведения рыб

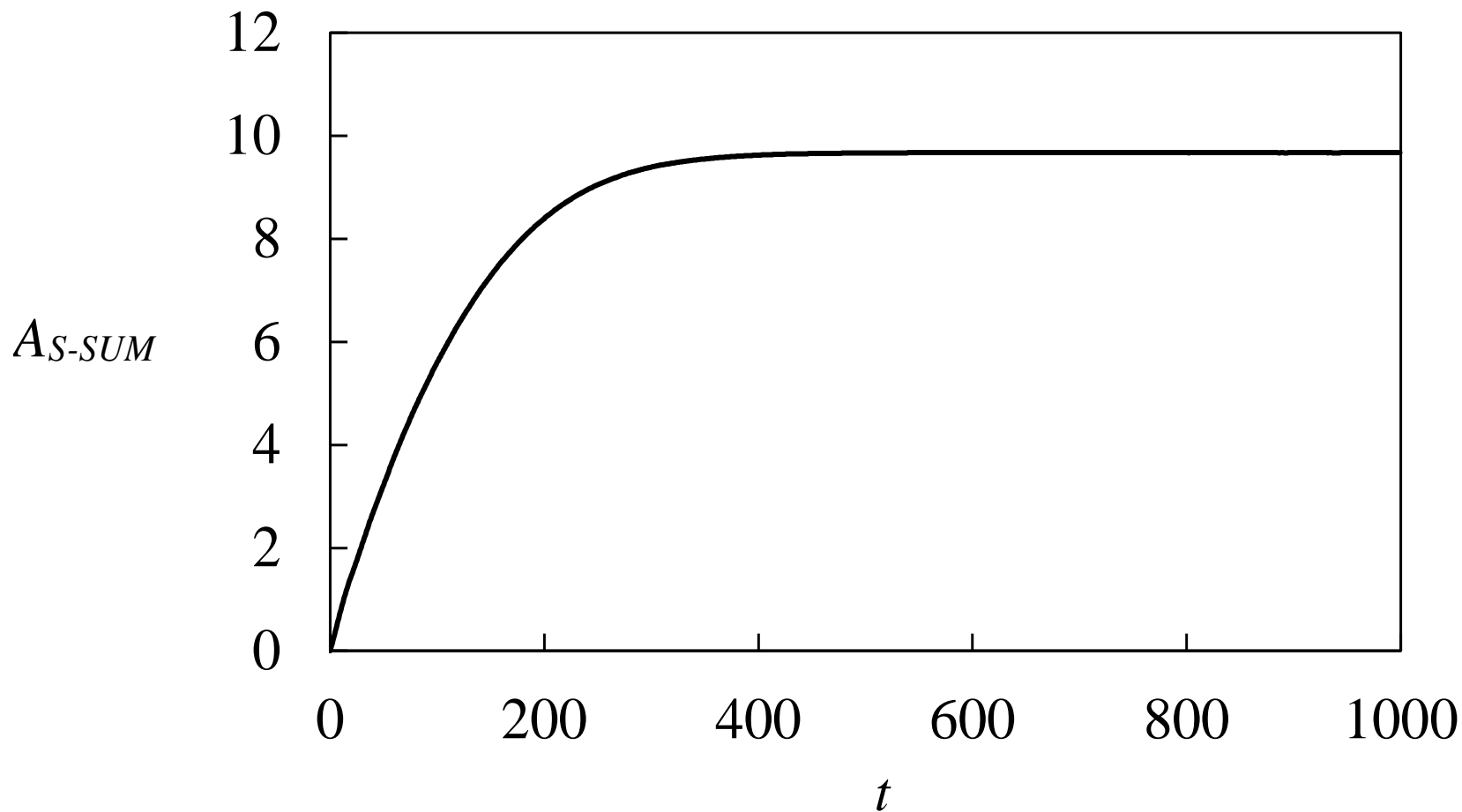
Построено 3 модели

Модель 1 описывает рост знаний о каждом из коридоров лабиринта.

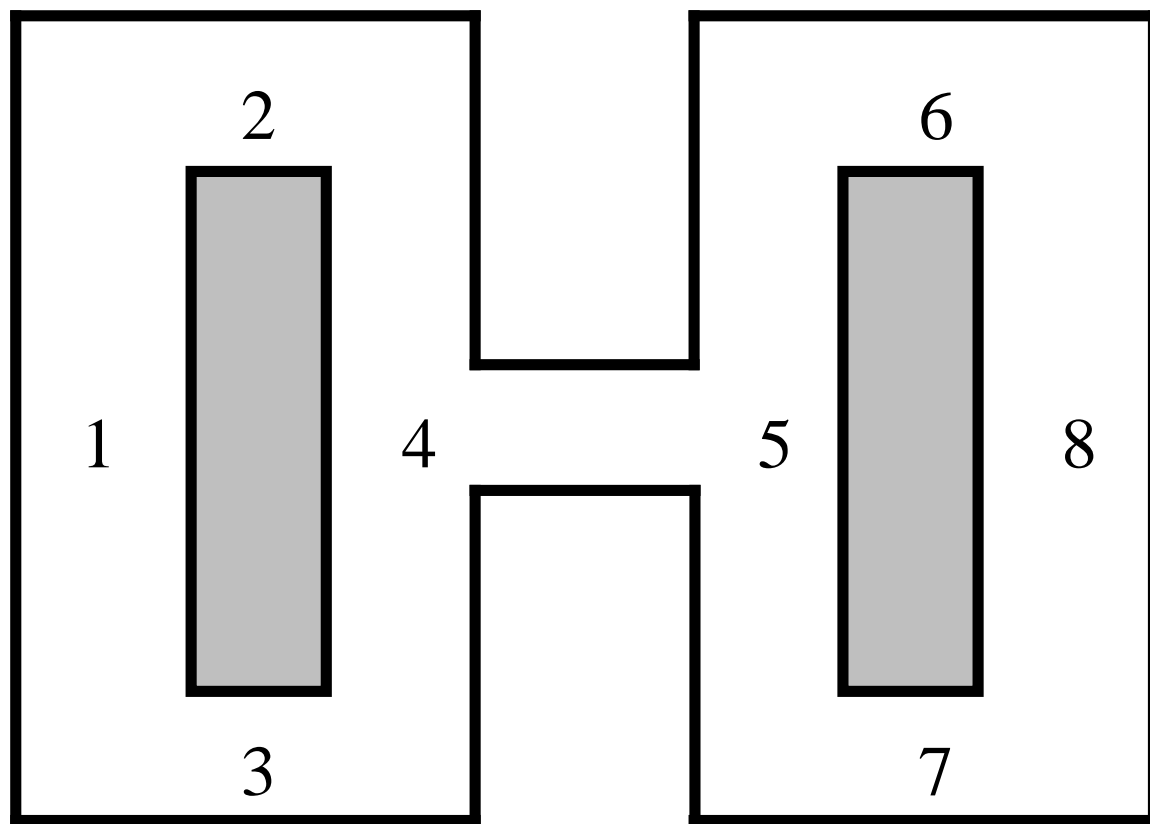
Модель 2 характеризует предсказания рыбы о будущей ситуации в лабиринте: $\{S_t, A_t\} \rightarrow S_{t+1}$.

Модель 3 предполагает, что после определенного изучения сложного лабиринта, рыба формирует обобщённые понятия, характеризующие лабиринт. А затем, используя эти понятия, рыба планирует движение к цели.

Динамика суммарной уверенности в предсказаниях



Гипотететическая модель планирования движения в лабиринте с 11 коридорами



Ситуации 1-8 -
существенные
места в
лабиринте.

Действия:
движение на
север (1), на юг
(2), на запад (3),
на восток (4)

Гипотетическая модель планирования движения в лабиринте с 11 коридорами

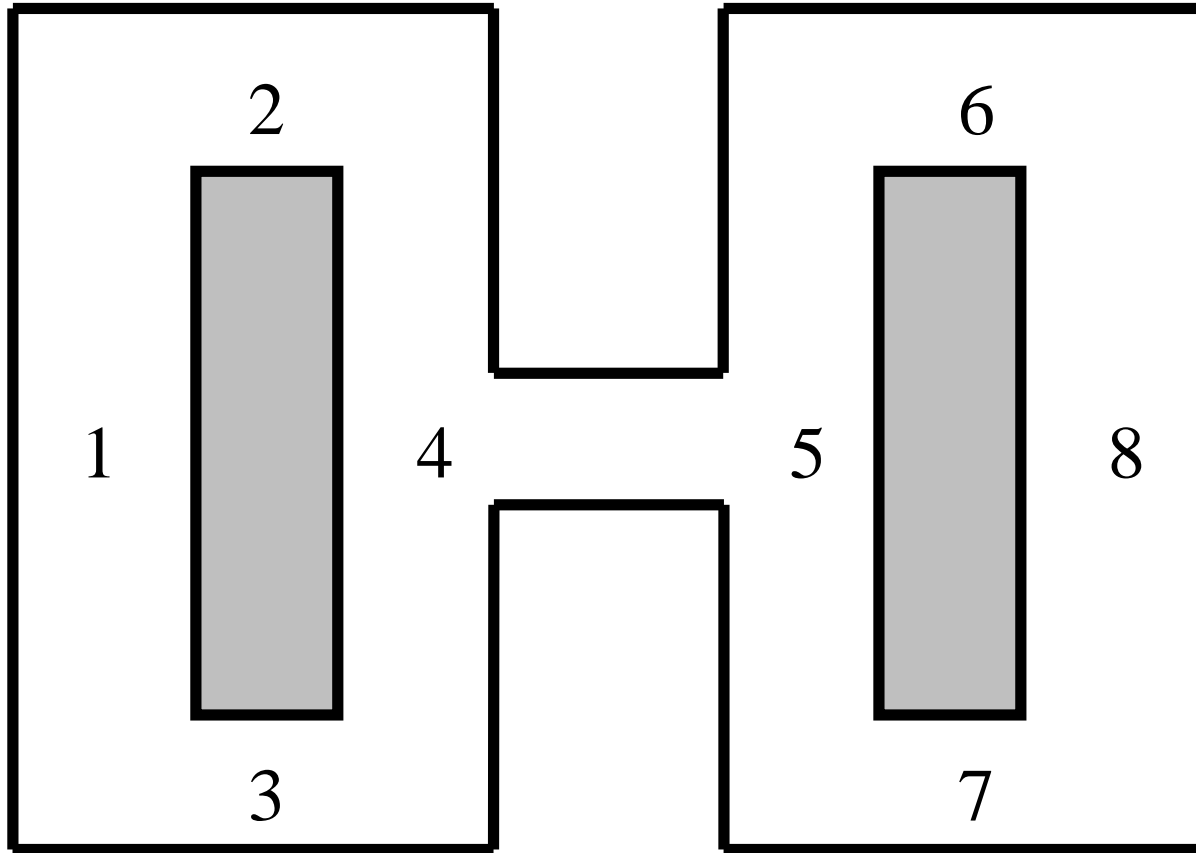
Пример: начальная ситуация 1, целевая ситуация 8.

Агент начинает от цели (8) и анализирует, из каких ситуаций (6, 7) можно попасть в целевую, потом как попасть в предцелевые ситуации и т.д.

Попутно агент оценивает **расстояние** от текущей ситуации до целевой, **расстояние равно числу необходимых действий, чтобы достичь цель.**

В результате формируется база знаний.

Гипотететическая модель планирования движения в лабиринте с 11 коридорами



Гипотетическая модель планирования движения в лабиринте с 11 коридорами

Результаты анализа

Шаг	$S_{previous}$	$A_{previous}$	$S_{current}$	Расстояние
1	6	4	8	1
2	7	4	8	1
3	5	1	6	2
4	5	2	7	2
5	4	4	5	3
6	2	4	4	4
7	3	4	4	4
8	1	1	2	5
9	1	2	3	5

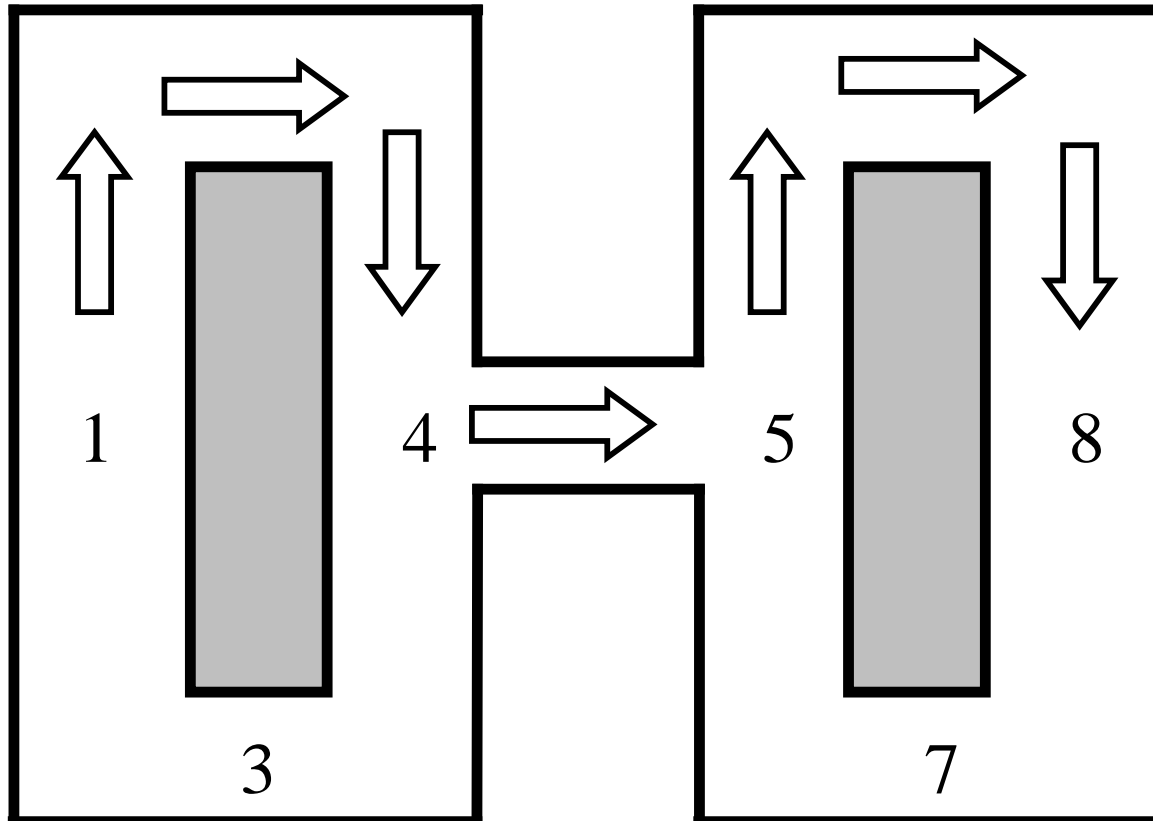
База знаний

Начальная ситуация	Число полезных действий	Действие	Следующая ситуация	Расстояние для начальной ситуации	Расстояние для следующей ситуации
1	2	1	2	5	4
1	2	2	3	5	4
2	1	4	4	4	3
3	1	4	4	4	3
4	1	4	5	3	2
5	2	1	6	2	1
5	2	2	7	2	1
6	1	4	8	1	0
7	1	4	8	1	0

Пример плана движения к цели

Начальная ситуация	Действие	Следующая ситуация
1	1	2
2	4	4
4	4	5
5	1	6
6	4	8

Пример плана движения к цели

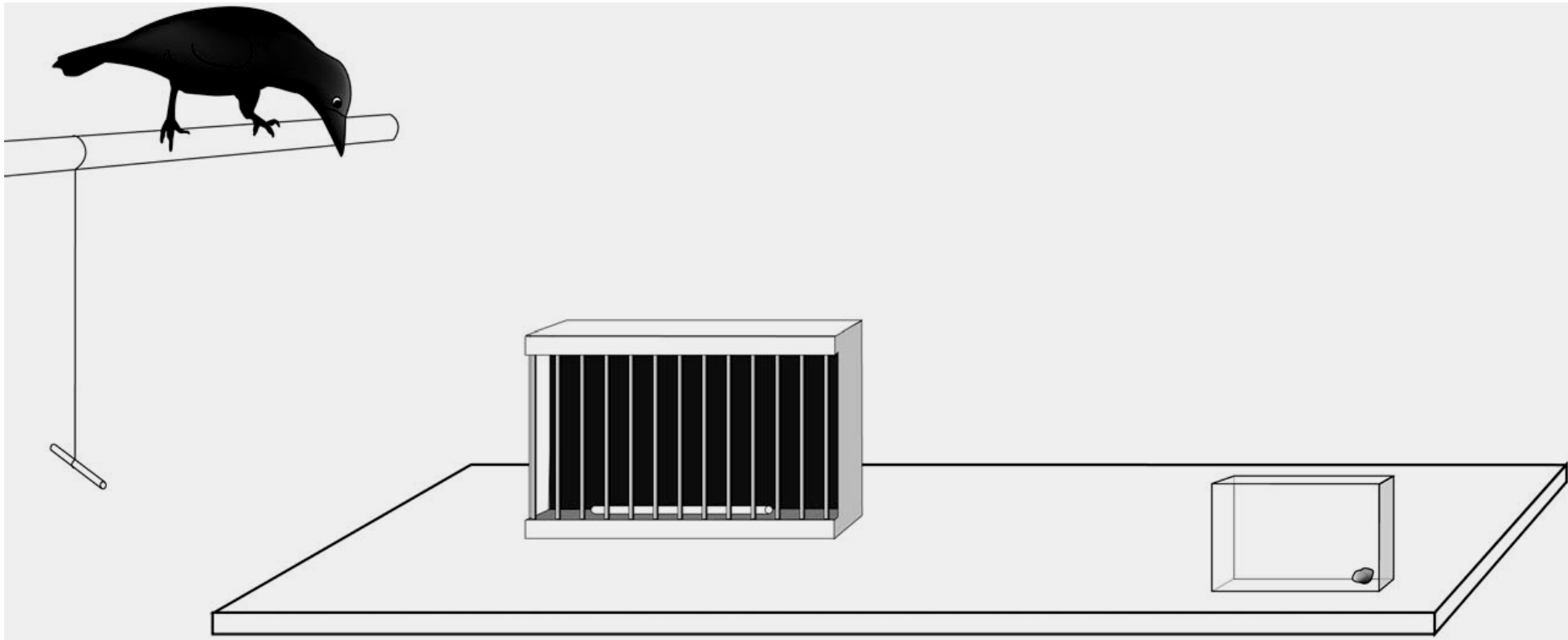


Модели исследовательского поведения рыб характеризуют

- накопление знаний**
- формирование предсказаний**
- планирование на основе знаний и предсказаний**

**Модель планирования
новокаледонскими воронами**

Вороны мысленно составляют планы цепочек целенаправленных действий



Действия: 1) Подтянуть шнуром маленькую палочку. 2) Маленькой палочкой достать длинную. 3) Длинной палочкой достать пищу.

Taylor A.H., Elliffe D., Hunt G.R., Gray R.D. Proc. R. Soc. B. 2010. V. 277. PP. 2637-2643.

Результаты составления плана воронами

	trial									
crow	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Sam (I)	Green	Green	Green	Orange	Green	Green	Green	Green	Green	Green
Caspar (I)	Light Green	Green	Green	Green	Green	Light Green	Green	Green	Green	Light Green
Maya (I)	Blue	Blue	Orange	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
Djinn (I)	Cyan	Blue	Blue	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Orange
Lazlo (C)	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
Chocho (C)	Green	Green	Light Green	Light Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
Korben (C)	Green	Light Green	Green	Green	Green	Light Green	Green	Green	Green	Green

3 вороны, имевшие опыт со всеми действиями отдельно, сразу решают задачу. 4 вороны, имевшие опыт с частью действий, решают задачу, но не всегда сразу. **Зеленый цвет – решение находится, синий – не находится, оранжевый – находится при малых поисковых вариациях**

Модель

Основные ситуации

S_1 : Короткая палочка привязана к концу шнура, длинная палочка во 2-м зарешеченном контейнере, пища в 1-м прозрачном контейнере

S_2 : Короткая палочка свободна, длинная палочка во 2-м контейнере, пища в 1-м контейнере

S_3 : Длинная палочка свободна, пища в 1-м контейнере

S_4 : Пища свободна – Целевая ситуация

Основные действия

A_1 . Поднять и освободить короткую палочку привязанную к концу шнура ($\{S_1, A_1\} \rightarrow S_2$)

A_2 : Вытащить длинную палочку из 2-го зарешеченного контейнера с помощью короткой палочки ($\{S_2, A_2\} \rightarrow S_3$)

A_3 : Вытащить пищу из 1-го прозрачного контейнера с помощью длинной палочки ($\{S_3, A_3\} \rightarrow S_4$)

Основные предположения модели

Имеется две группы ворон:

- 1) Сильно обученные
- 2) Слабо обученные

Вороны способны делать предсказания:

$$\{S_{current}, A_{current}\} \rightarrow S_{next}$$

Существенные предсказания, полученные в результате обучения:

Сильно обученные

$$\{S_3, A_3\} \rightarrow S_4, \quad \{S_2, A_2\} \rightarrow S_3$$

Слабо обученные

$$\{S_3, A_3\} \rightarrow S_4$$

Недостающие предсказания

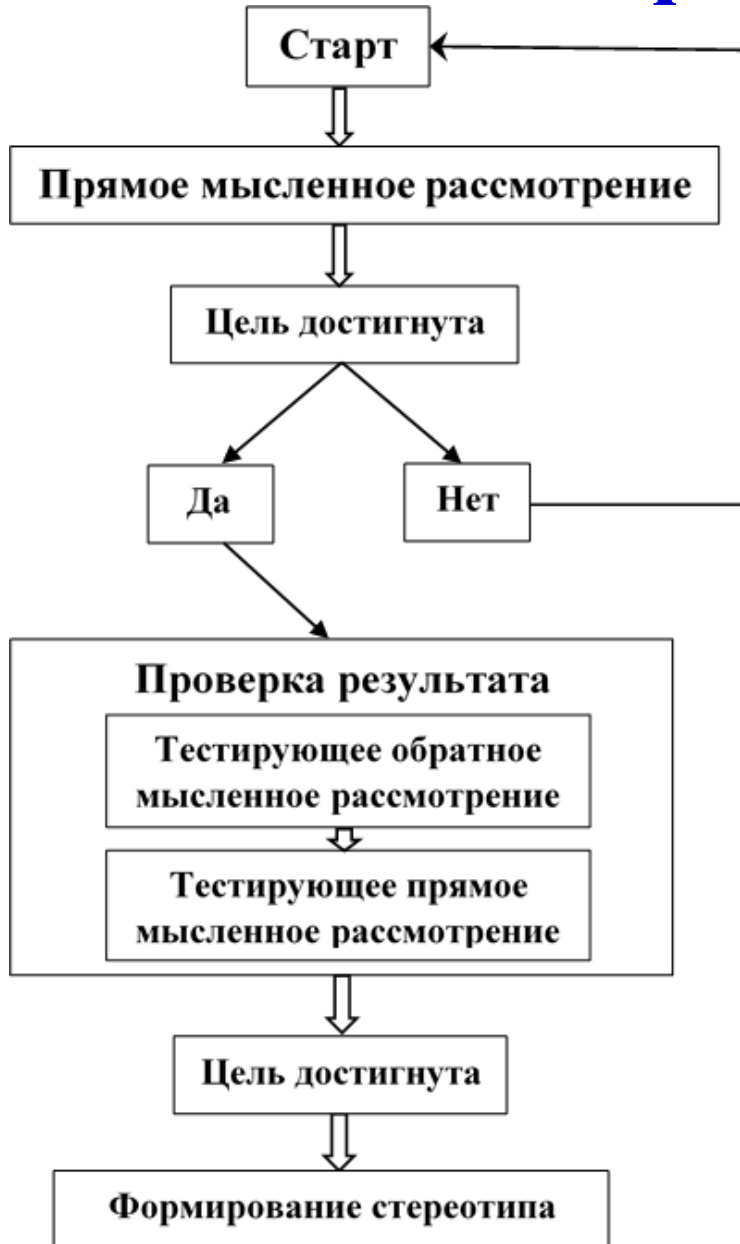
Сильно обученные

$$\{S_1, A_1\} \rightarrow S_2$$

Слабо обученные

$$\{S_1, A_1\} \rightarrow S_2, \{S_2, A_2\} \rightarrow S_3$$

Механизм формирования плана

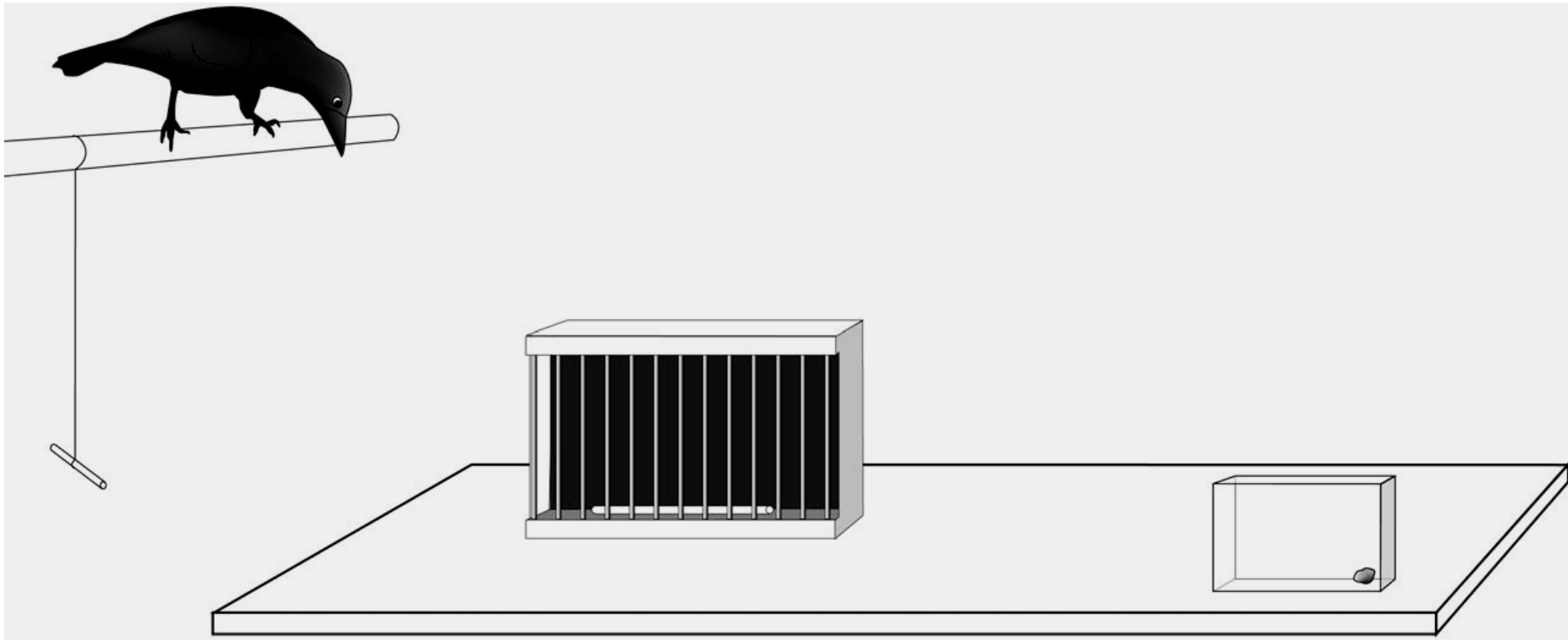


В процессе прямого мысленного рассмотрения вороны догадываются с определенными вероятностями до недостающих предсказаний.

Уверенности в правильных мыслимых предсказаниях возрастают.

После угадывания нужных предсказаний формируется база знаний, по которой формируется план поведения и стереотип поведения

Вороны мысленно составляют планы цепочек целенаправленных действий



Действия: 1) Подтянуть шнуром маленькую палочку. 2) Маленькой палочкой достать длинную. 3) Длинной палочкой достать пищу.

Taylor A.H., Elliffe D., Hunt G.R., Gray R.D. Proc. R. Soc. B. 2010. V. 277. PP. 2637-2643.

Вероятности угадывания правильных предсказаний в одной пробе

Сильно обученные

P_1 для $\{S_1, A_1\} \rightarrow S_2$

Слабо обученные

P_2 для $\{S_1, A_1\} \rightarrow S_2$, P_3 для $\{S_2, A_2\} \rightarrow S_3$

$P_1 > P_2 > P_3$ В расчетах $P_1 = 0.9, P_2 = 0.7, P_3 = 0.5$

**После проверки результатов и возрастания
уверенностей в предсказаниях формируется
база знаний модельных ворон**

База знаний модельных воронок

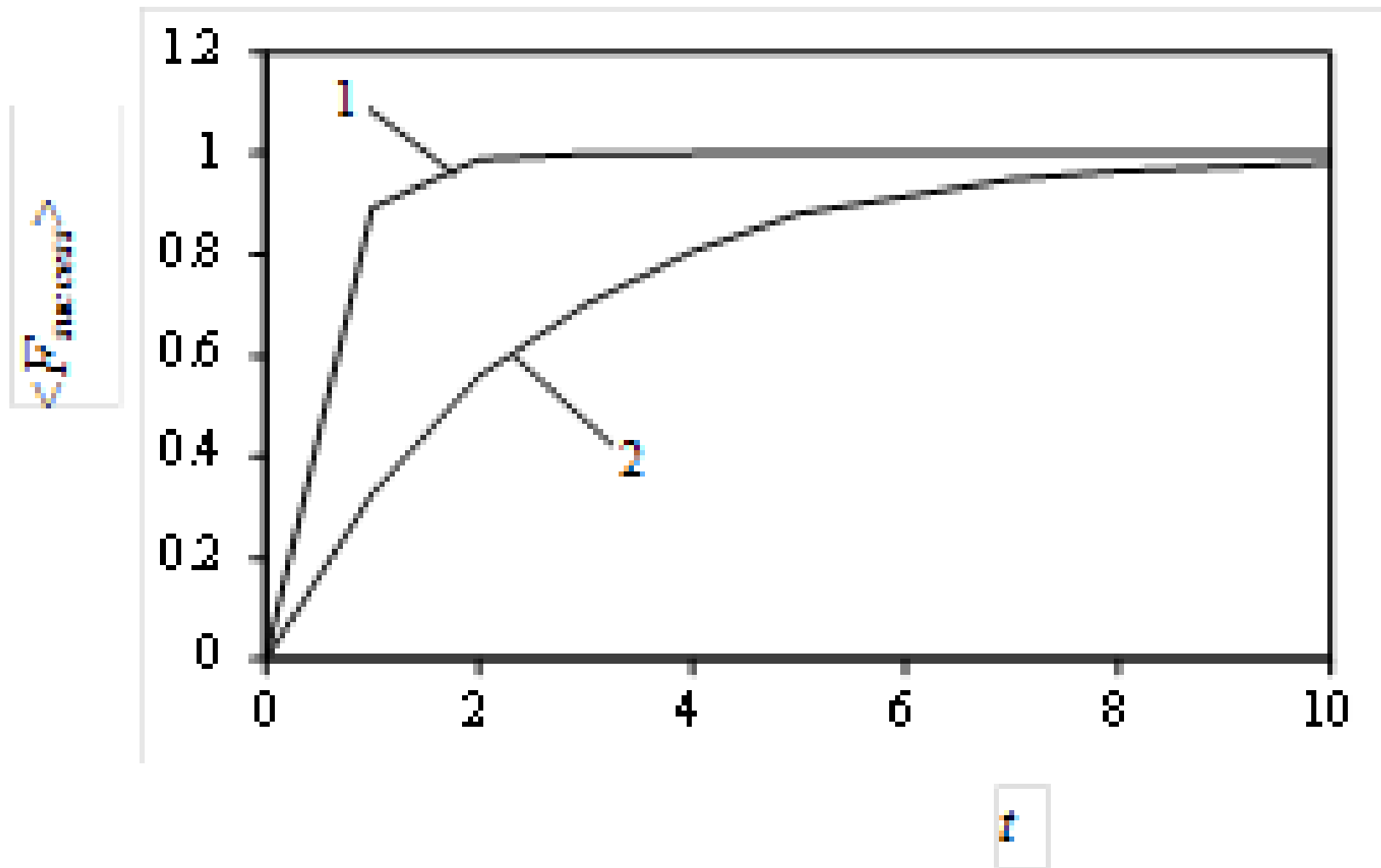
Initial situation, $S_{initial}$	Action, $A_{current}$	Next situation, S_{next}	$\rho(S_{initial}, S_4)$	$\rho(S_{next}, S_4)$
S_1	A_1	S_2	3	2
S_2	A_2	S_3	2	1
S_3	A_3	S_4	1	0

ρ – расстояние до цели (число требуемых действий)

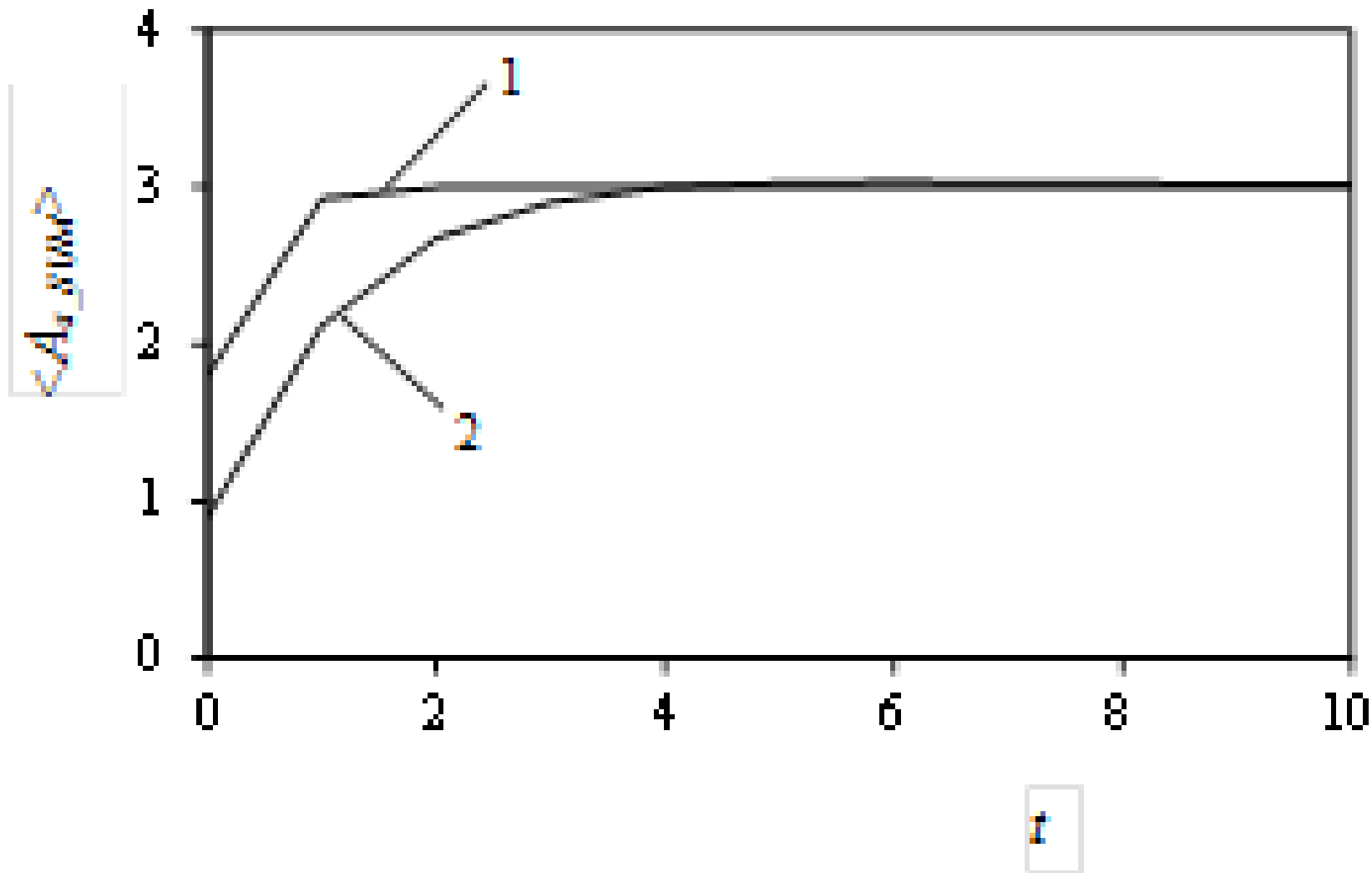
Эта база знаний и есть план действий

Результаты моделирования

Динамика частоты нахождения решения



Динамика суммарной уверенности в предсказаниях



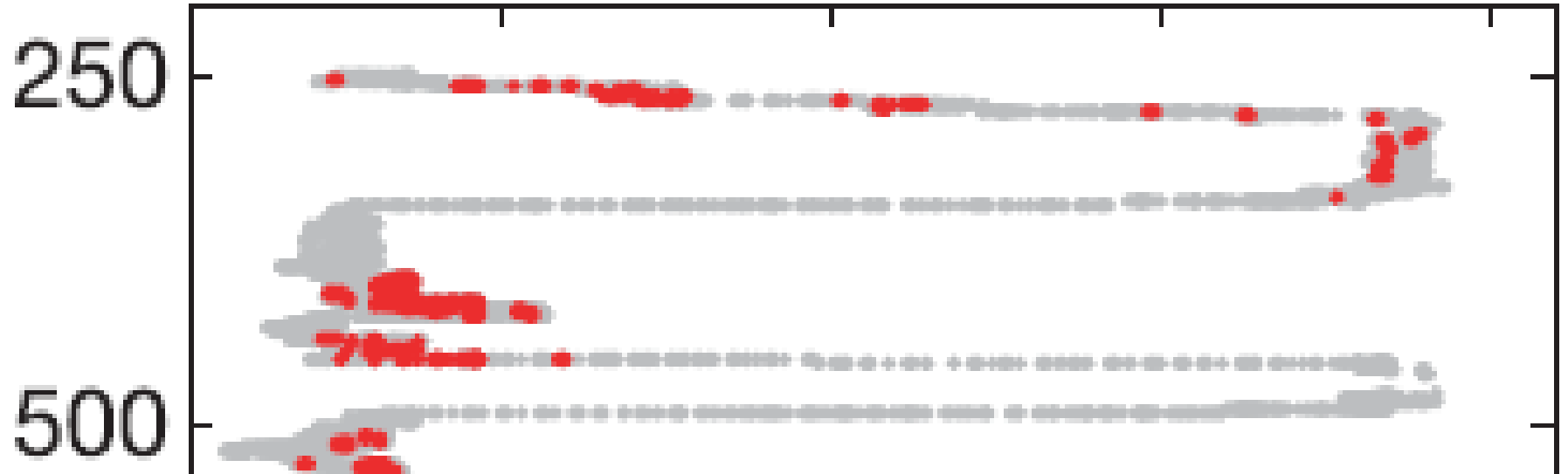
Почему проверка результата

Имеются экспериментальные данные (на крысах), показывающие, что подобная проверка найденного решения происходит:

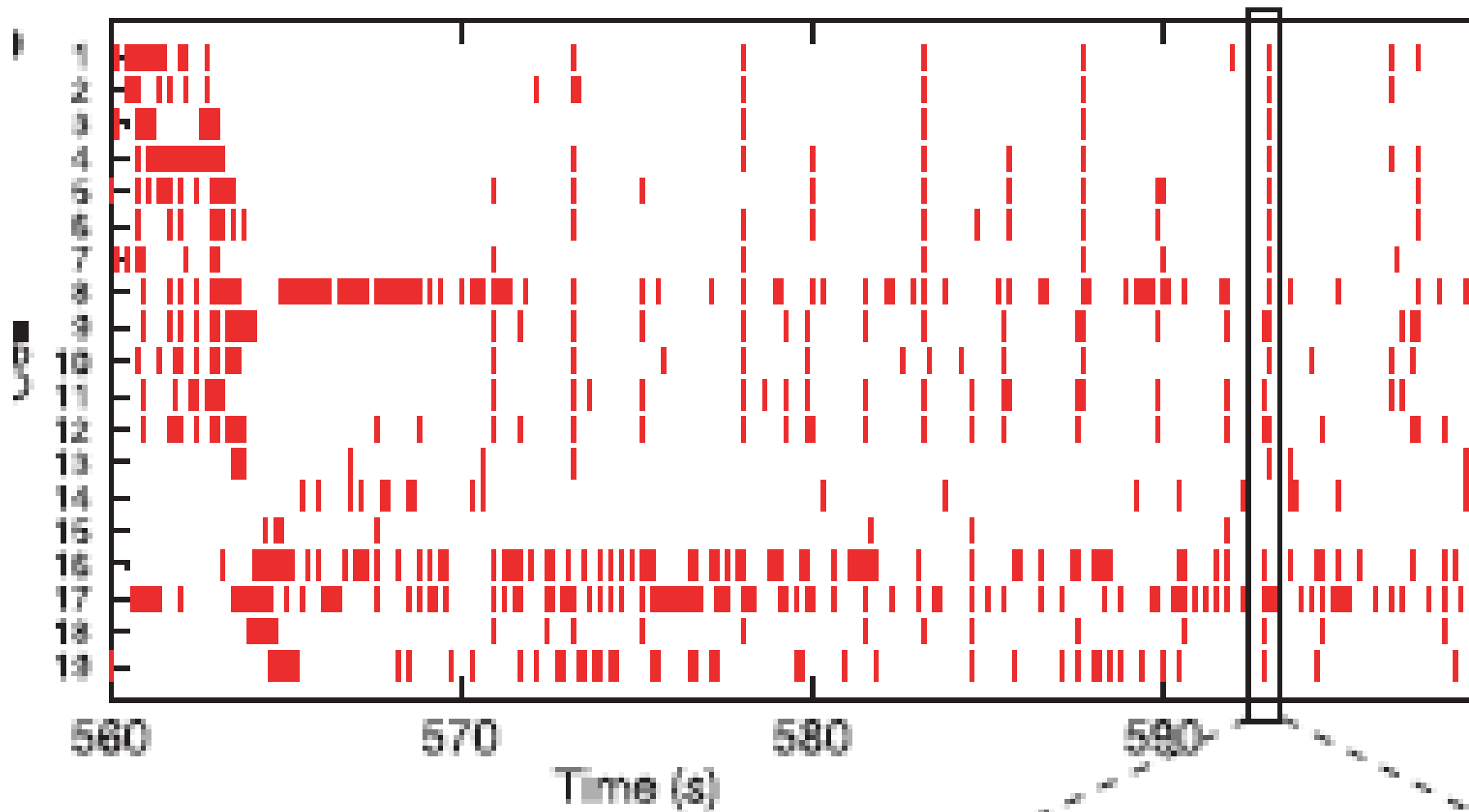
Foster D.J., Matthew A., Wilson M.A. Reverse replay of behavioural sequences in hippocampal place cells during the awake state. Nature. 2006. V. 440. No. 7084.

Diba K., Buzsaki G. Forward and reverse hippocampal place-cell sequences during ripples. Nature Neuroscience. 2007. V. 10. No. 10.

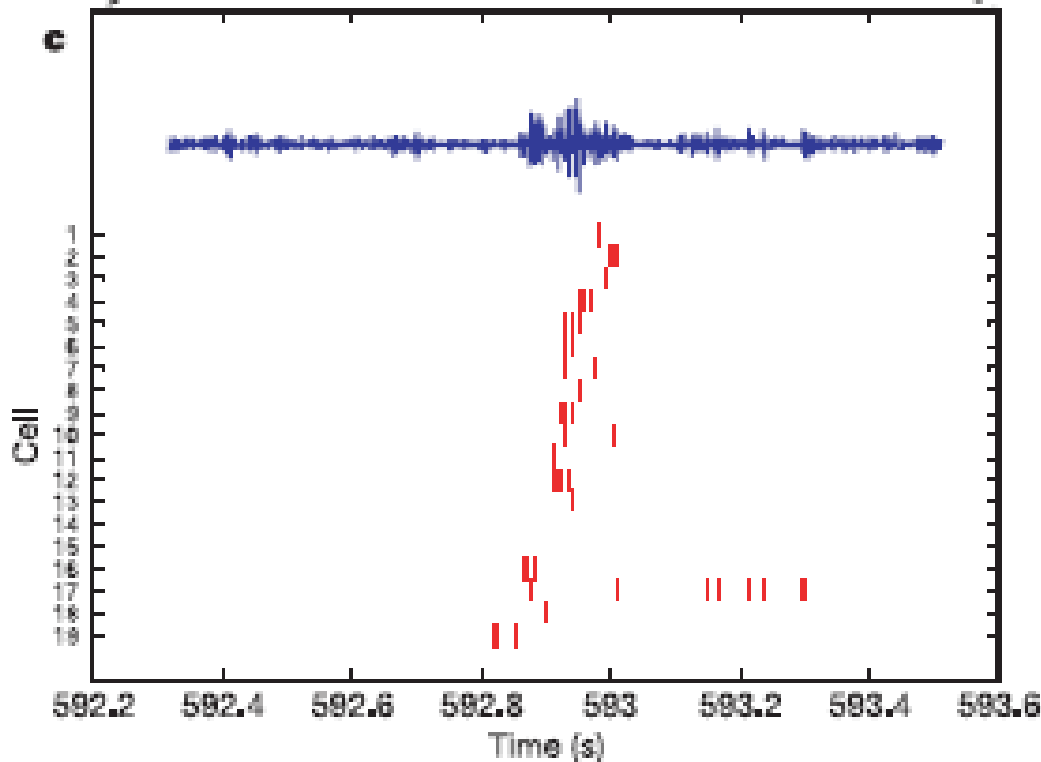
Крыса после нахождения пищи мысленно «проигрывает» обратно путь нахождения



Крыса после нахождения пищи мысленно «проигрывает» путь нахождения

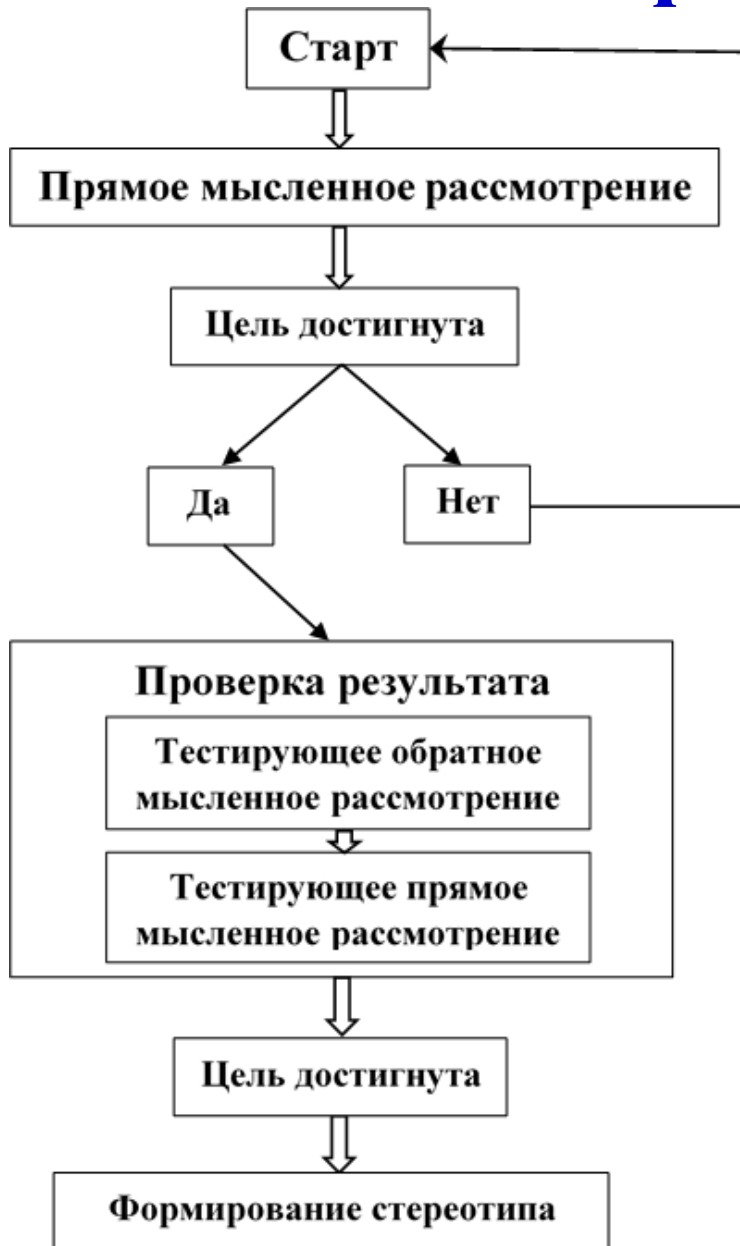


Крыса после нахождения пищи мысленно «проигрывает» обратно путь нахождения



Регистрировались
активные
нейронные
клетки места
в гиппокампе.
Согласно
эксперименту,
крыса вспоминала
путь, которым она
достигла желаемого
результата

Механизм формирования плана



В процессе прямого мысленного рассмотрения вороны догадываются с определенными вероятностями до недостающих предсказаний.

Уверенности в правильных мыслимых предсказаниях возрастают.

После угадывания нужных предсказаний формируется база знаний, по которой формируется план поведения и стереотип поведения

Дальнейшая работа по представленным моделям

Обсудить модель по воронам с биологами, проводившими эксперименты.

Развитие уже разработанных моделей.

Моделирование предсказаний, формирования планов, формирования и использования внутренних моделей животных, моделирование правдоподобных логических выводов, сопоставление «логики» животных с логикой человека ...

Нерешенные проблемы

**Модель автономного агента,
познающего законы природы**

Возможна ли модель ученого-физика?

М.Н. Вайнцвайг. Обучение управлению поведением в мире объектов пространства-времени // Лекция на конференции «Нейроинформатика-2011»

Предложены принципы компьютерного моделирования агента, познающего закономерности механики движущихся тел. И начато собственно моделирование (совместно с В.В. и П.В. Максимовыми, ИППИ РАН)

Возникает вопрос: может ли такой агент самостоятельно открыть три закона Ньютона?

Возможна ли модель ученого-физика?

Red'ko V.G. Principles of functioning of autonomous agent-physicist // Proceedings of BICA 2012. P. 265-266.

Компьютерный агент, нацеленный на открытие законов механики, должен обладать следующими свойствами (аналогично Исааку Ньютону):

- иметь стремление к новым знаниям и к формулировке этих знаний в четкой, компактной форме, такой как законы Ньютона или аксиомы Евклида;**
- задавать вопросы о принципах взаимодействия тел и решать эти вопросы с помощью физических экспериментов.**

Возможна ли модель ученого-физика?

- Должен быть коллектив агентов, исследующий внешний мир, и коммуникации между агентами. Должно быть самосознание агентов, эмоциональная самооценка результатов своей деятельности и стремление агента достигнуть наиболее высоких результатов в коллективе агентов.
- Агенты должны освоить возможности логических выводов, позволяющих получить многочисленные следствия законов и аксиом.
- Понятно, что путь к интеллекту такого уровня весьма непрост, но, все же, он просматривается.

Модели гениальных птиц (по фильму «Клюв и мозг»)

В фильме рассказывается о поведении попугаев кеа (из Новой Зеландии) и новокаледонских ворон

Биологический эксперимент 1

Орнитолог Гевин Хант (**Gavin Hunt**, The University of Auckland, New Zealand) непосредственно в лесу приготовил специальный **«обеденный стол» для новокаледонских ворон**: толстый кусок ствола дерева с просверленными тонкими, глубокими отверстиями. В отверстия он положил кусочки мяса, потом спрятался в палатке и наблюдал за воронами.

Осторожные вороны прилетели к «столу» не сразу. Но потом они прилетели, стали изготавливать **орудия для добычи пищи (палочки из веточек и стеблей растений)** и научились с помощью достаточно длинных палочек (а еще лучше с помощью палочек с крючком на конце) доставать пищу из глубоких отверстий.

Биологический эксперимент 2

Было проведено два опыта: с попугаями кеа и с новокаледонскими воронами. И те, и другие птицы должны были решать одни и те же задачи: происходило соревнование между попугаями и воронами.

Эксперименты проводились в Европе в двух местах на расстоянии 500 км. друг от друга. Эксперименты проводили Алиса Ауершперг (Alice M.I. Auersperg, University of Veterinary Medicine, Vienna, Austria) с попугаями и Августа фон Байерн (Auguste M.P. von Bayern, Max Planck Institute for Ornithology, Pocking, Germany) с воронами.

Биологический эксперимент 2

Птицам в лабораторных условиях давали задание: **добыть вкусную пищу из довольно сложного экспериментального устройства, используя простые орудия: веревочки, палочки, шары, камешки.** Орудия были разбросаны возле экспериментальной установки. Используемые экспериментальные устройства были сделаны из прозрачного пластика, так что птицы хорошо видели свою цель.

До решения надо было догадаться: просунуть палочку в нужное место установки, протолкнуть шар в подходящее отверстие или кинуть камешек в соответствующее место, чтобы камешек вытолкнул пищу из установки.

Биологический эксперимент 2

В результате и попугаи, и вороны успешно решили все предложенные ими задания. Получилось это не с первого раза, были и пробные неудачные попытки, но в конце концов птицы успешно справились с предложенными им заданиями.

Этот эксперимент показал, что попугаи кеа и новокаледонские вороны имеют примерно одинаковый уровень догадливости, одинаковый и достаточно высокий уровень когнитивных способностей.

Основная литература

Редько В.Г. Моделирование когнитивной эволюции: На пути к теории эволюционного происхождения мышления. М: ЛЕНАНД/URSS, 2015

Научно-популярный фильм «Клюв и мозг. Гениальные ПТИЦЫ»