МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
Биологический факультет - Кафедра высшей нервной деятельности
Институт перспективных исследований мозга МГУ

Зрительная категоризация в биологических и искусственных системах

Екатерина Андреевна Диффинэ
diffineea@my.msu.ru

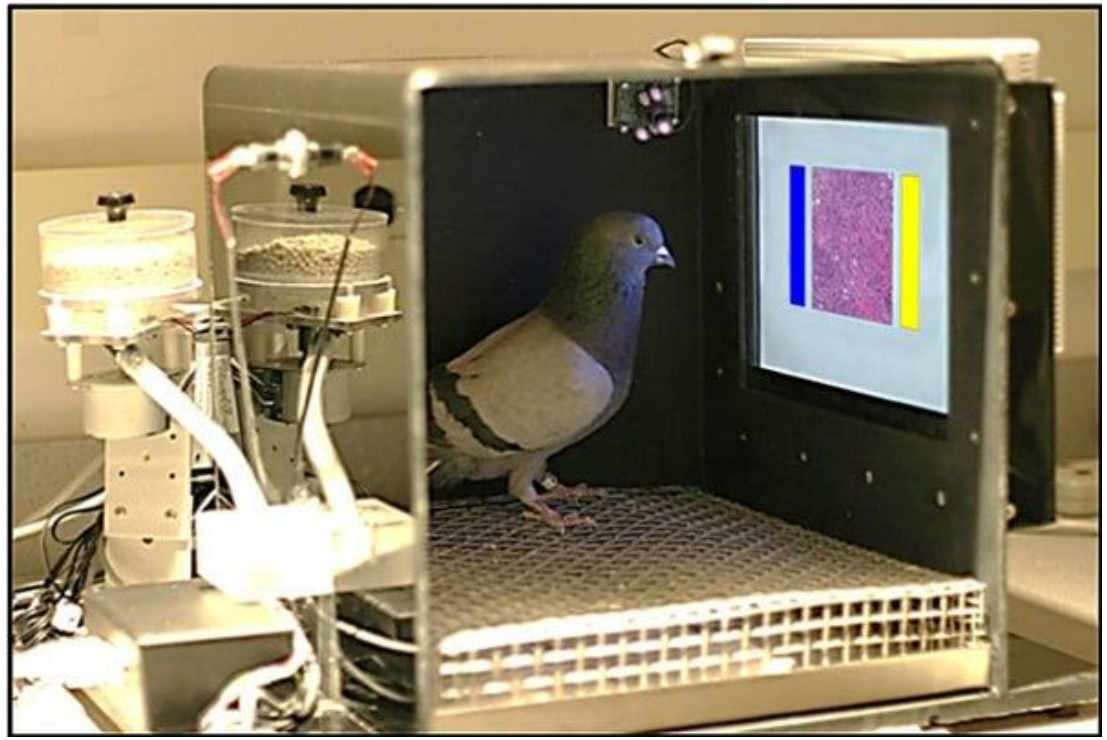
Санкт-Петербург, 2025

Категоризация в биологических системах

Категоризация – классификация объектов и событий на основе ключевых признаков, позволяющая воспринимать похожие стимулы как эквивалентные.

Птицы способны:

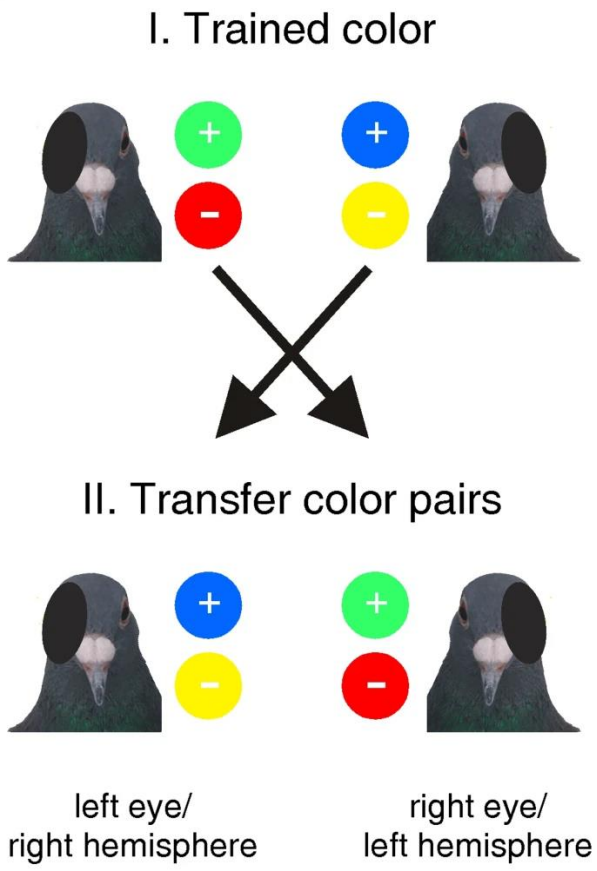
- обрабатывать и классифицировать орфографию четырехбуквенных слов
- различать изображения человеческих лиц, птиц и млекопитающих разных видов, и т.д.
- различать доброкачественные и злокачественные гистологические изображения
- различать цветовые оттенки картин Моне и Пикассо

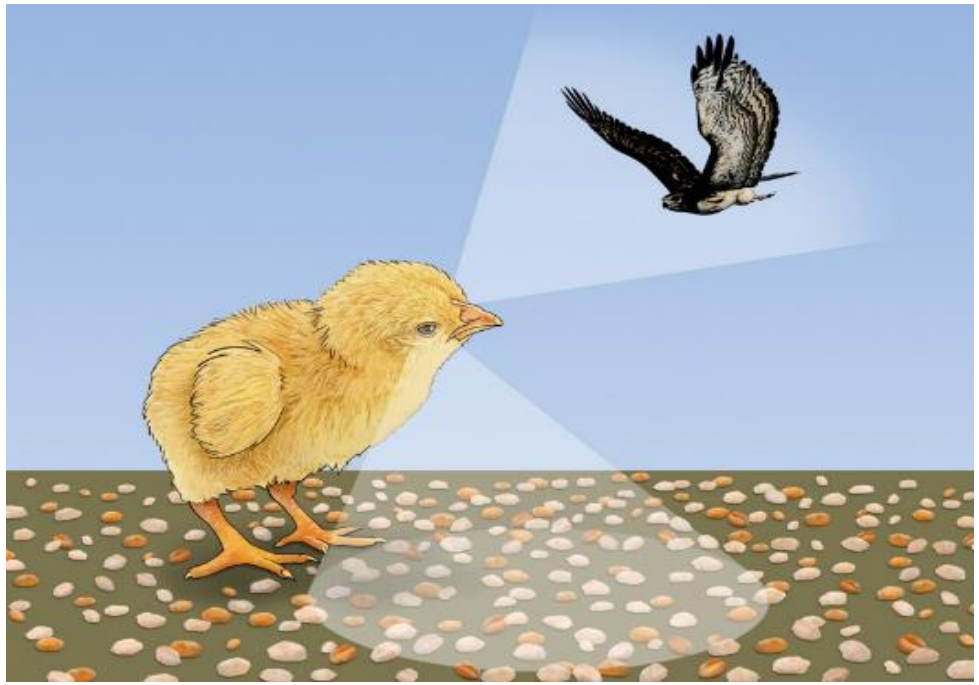


Edward A. Wasserman, 2015. Pigeons (Columba livia) as Trainable Observers of Pathology and Radiology Breast Cancer Images

Scarf et al. 2016, Herrnstein et al., 1976, Watanabe et al. 1995; Anderson et al. 2020 Watanabe, 2011; Watanabe, Sakamoto, Wakita, 1995, Lubow, 1974, Levenson et al. 2015, Troje et al., 1999, Cook et al., 2013, Cerella, 1980, 1986, Smith et al., 2016; Matsukawa, Inoue, Jitsumori, 2004; Qadri Cook, 2017; Wasserman, 2016; Nakamura, Croft, Westbrook, 2003

Функциональная и структурная асимметрия мозга птиц

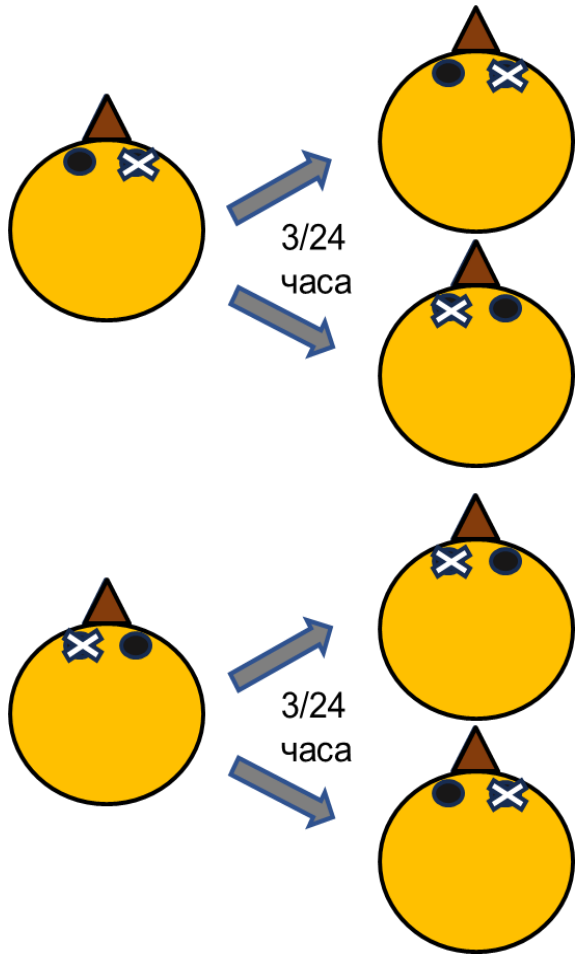




Функциональная латерализация мозга птиц: правое полушарие больше вовлечено в обработку новой информации и быстрой ответной реакции, а левое - в категоризацию стимулов

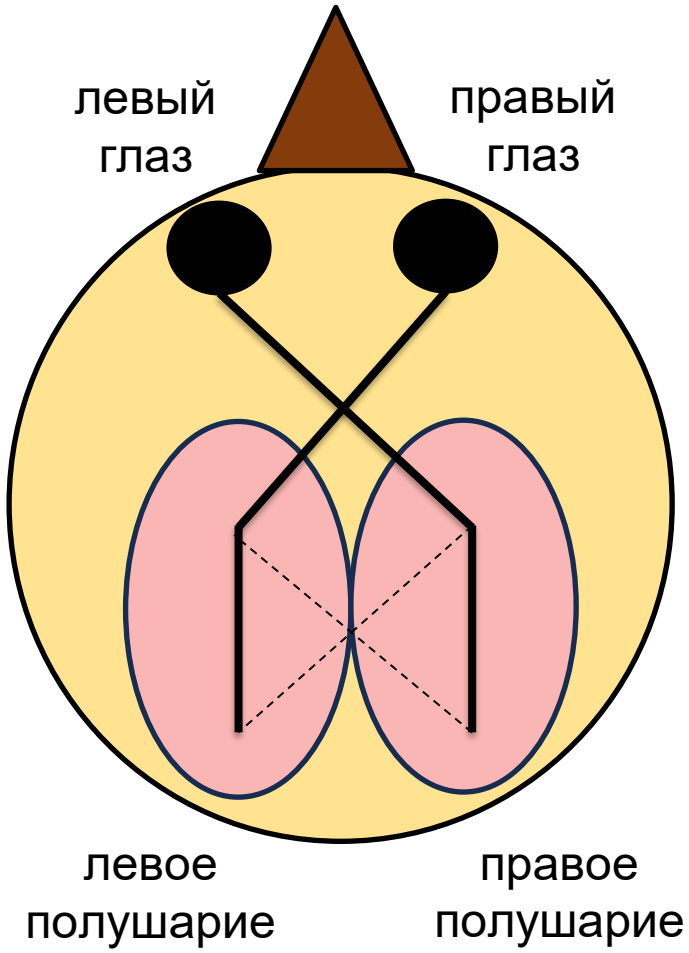
Rogers, 2005; Letzner et al. 2014; Gunturkun et al.,2020

Односторонний перенос категоризационной памяти у цыплят

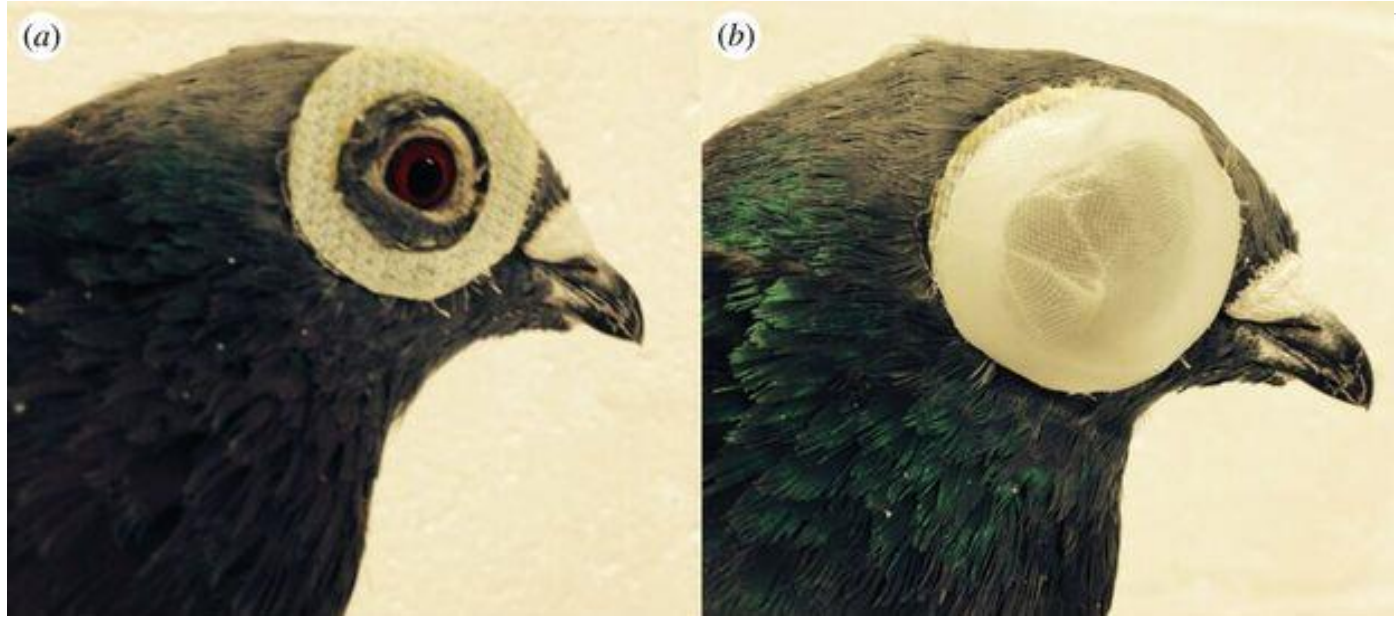


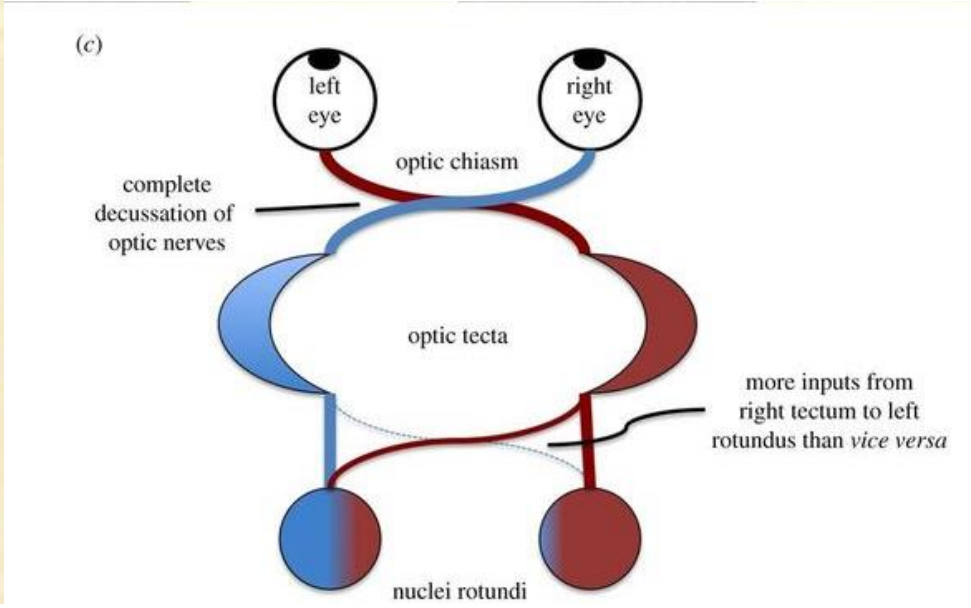
При тестировании через 24 часа категоризационная память, сформированная с использованием левого глаза, была доступна для извлечения через систему правого

Tiunova et al, 1996



Латерализация мозга птиц





Martinho et al., 2015

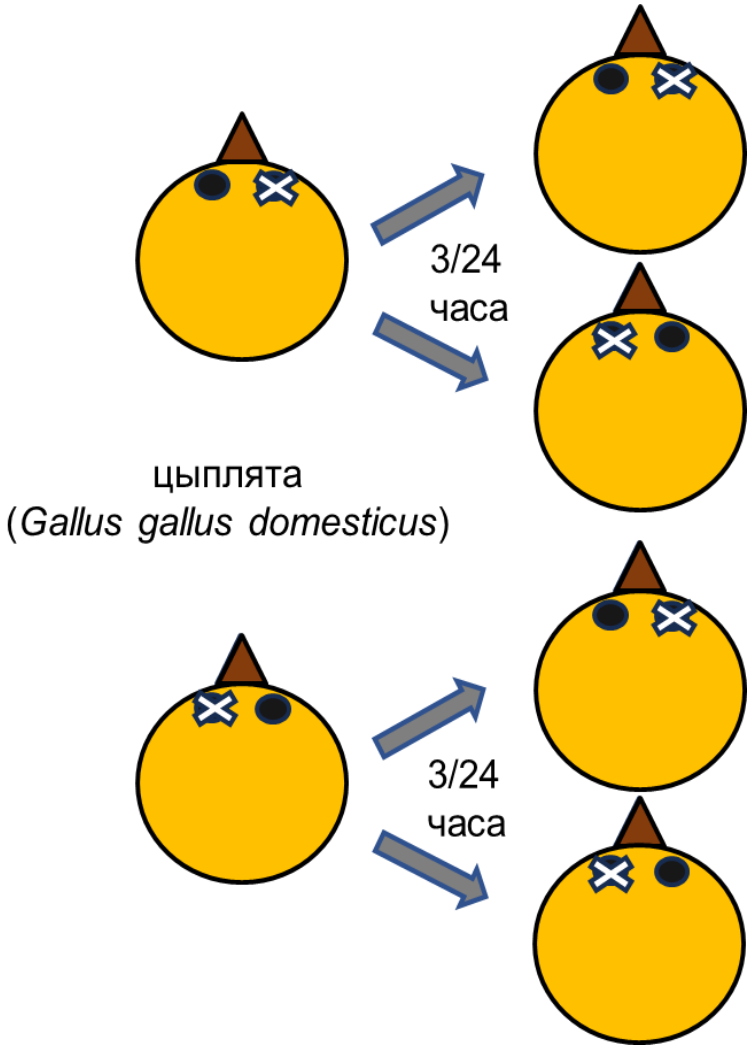
Интерокулярный перенос (или межполушарный перенос) у птиц — это процесс передачи информации, полученной через зрительную систему одного глаза (и обработанной в противоположном полушарии мозга), в контралатеральное полушарие, с последующей возможностью извлечения.

Модель «бусиничный пол»

На полу приклеены бусины нескольких цветов и рассыпаны гранулы корма

Tiunova et al., 1996

Схема эксперимента с цыплятами



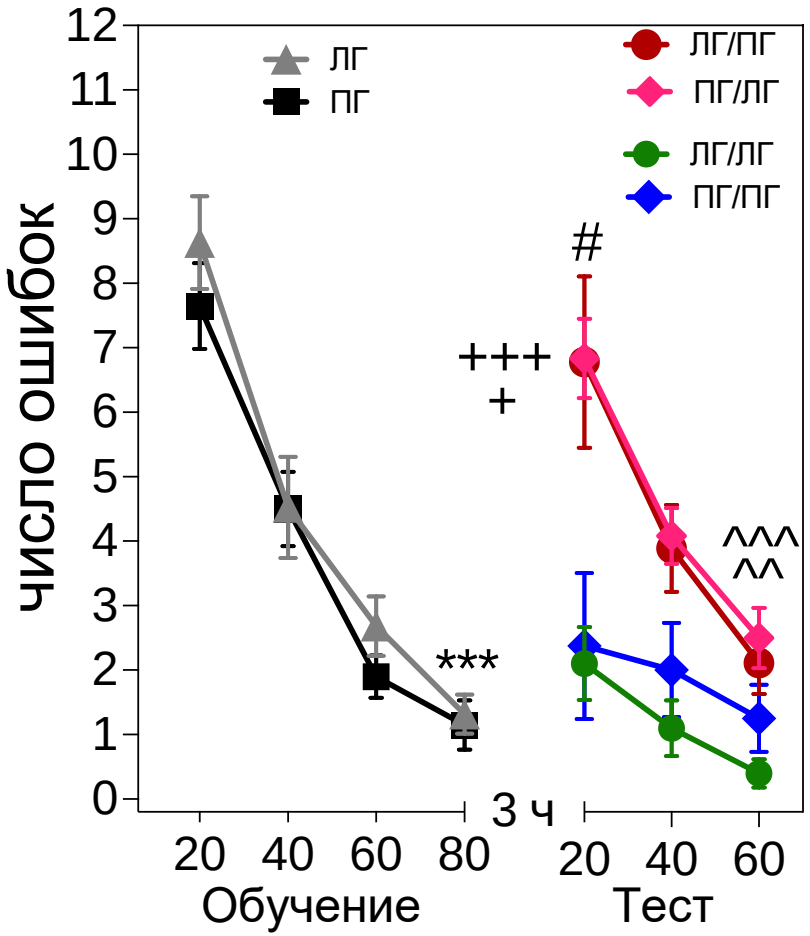
За 1 час до обучения и тестирования птицам закрывали правый или левый глаз.

В эксперименте участвовали как самцы, так и самки.

Экспериментальные группы:
ЛГ/ПГ – закрыт левый глаз при обучении и правый при тестировании
ПГ/ЛГ – закрыт правый глаз при обучении и левый при тестировании

Контрольные группы:
ЛГ/ЛГ -- закрыт левый глаз при обучении и тестировании
ПГ/ПГ – закрыт правый глаз при обучении и тестировании.

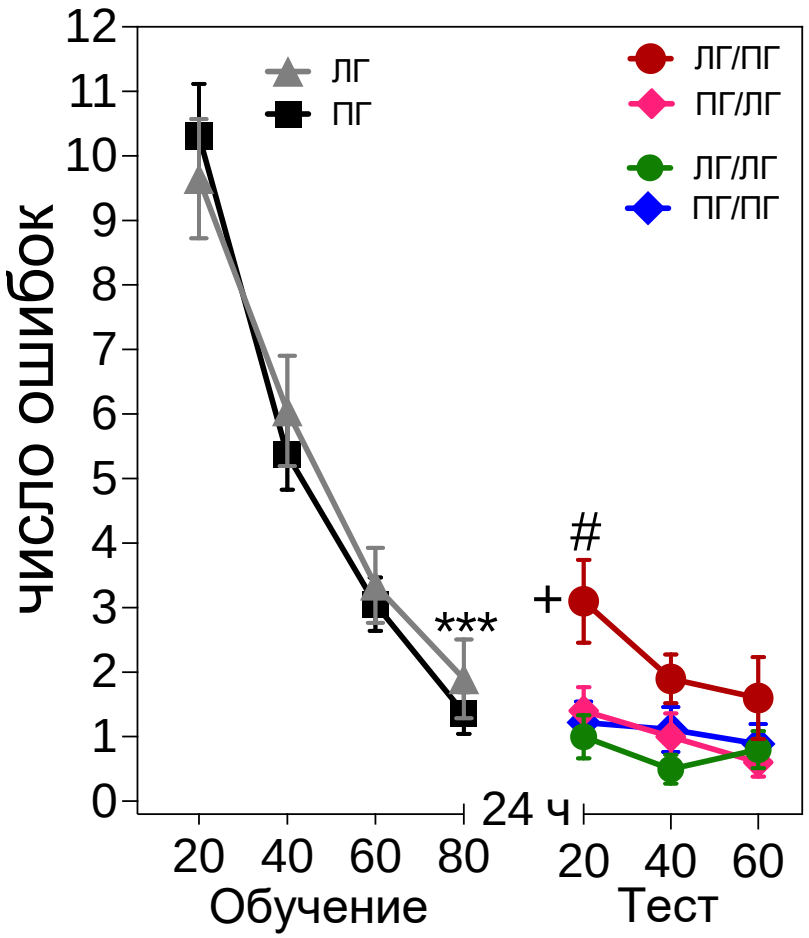
Монокулярное обучение и тестирование через 3 часа



При тестировании цыплят через 3 часа после обучения интерокулярный перенос не происходит

Двухфакторный дисперсионный анализ ANOVA, апостериорный критерий Тьюки, Шидака: $^{***}P<.001$ по сравнению с первым блоком обучения; $^{***}P<.001$ по сравнению с первым блоком обучения; $^{\wedge\wedge\wedge}P<.001$ (ПГ/ЛГ), $^{\wedge\wedge}P<.01$ (ЛГ/ПГ) по сравнению с первым блоком теста; $^{\#}P<.05$ у экспериментальных групп по сравнению с первым блоком тестирования в контрольной группе.
Т-тест: $^{+++}P<.001$ (ПГ/ЛГ), $^{+}P<.05$ (ЛГ/ПГ) по сравнению с последним блоком обучения.
ЛГ/ПГ (n = 9), ПГ/ЛГ (n = 12), ЛГ/ЛГ (n = 10), ПГ/ПГ (n = 9)

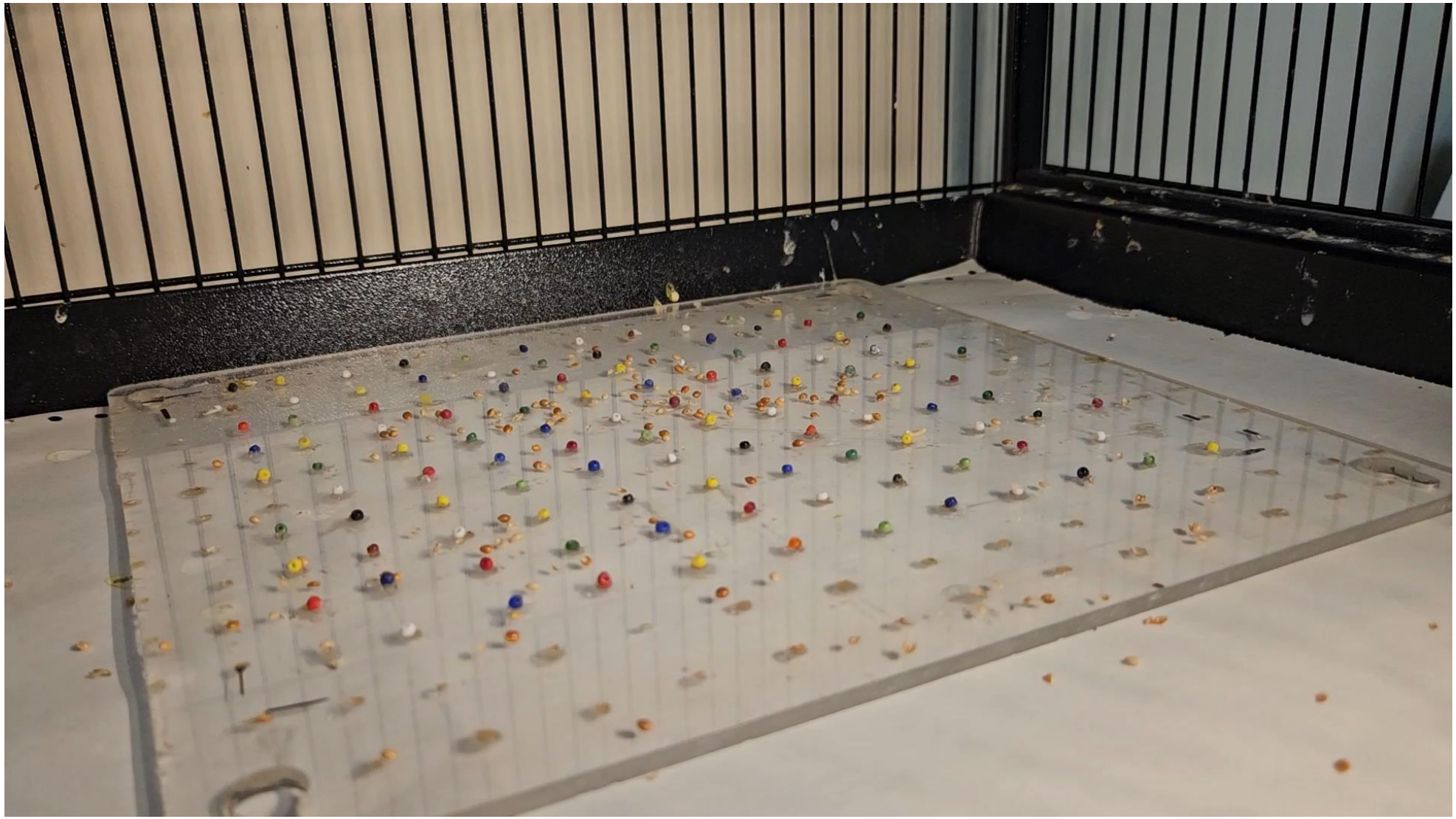
Монокулярное обучение и тестирование через 24 часа



Интерокулярный перенос наблюдается от правого полушария к левому, но не в обратном направлении

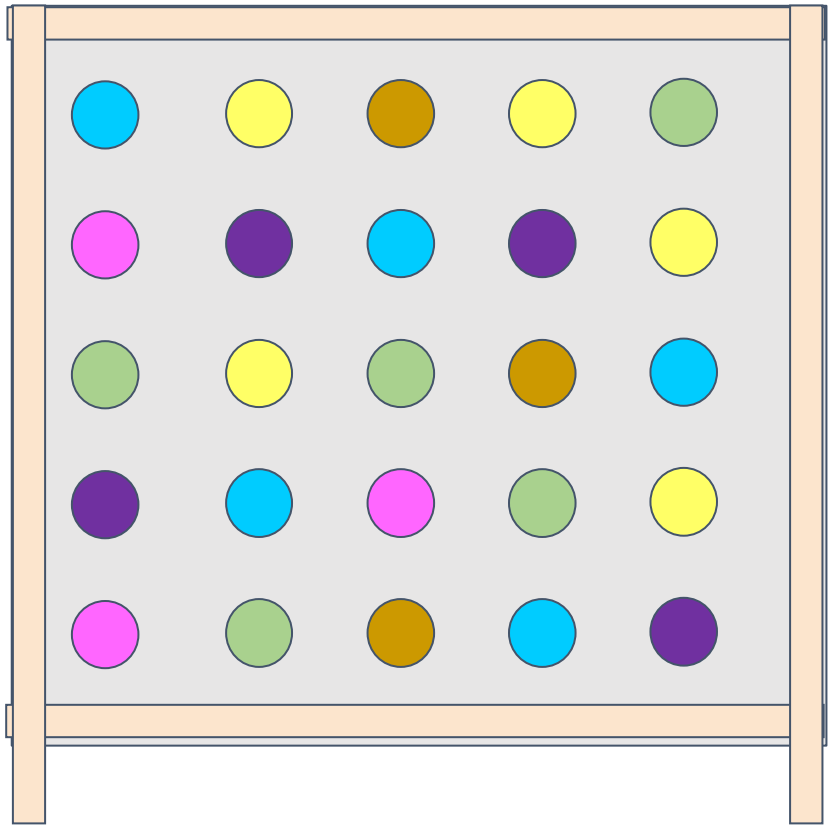
Двухфакторный дисперсионный анализ ANOVA: ***P<.001 по сравнению с первым блоком обучения; #P<.05 у группы ЛГ/ПГ по сравнению с первым блоком тестирования в контрольной группе.
Т-тест: +P<.05 у группы ЛГ/ПГ по сравнению с последним блоком обучения.
ЛГ/ПГ (n = 9), ПГ/ЛГ (n = 10), ЛГ/ЛГ (n = 10), ПГ/ПГ (n = 9)

Эксперименты с амадинами



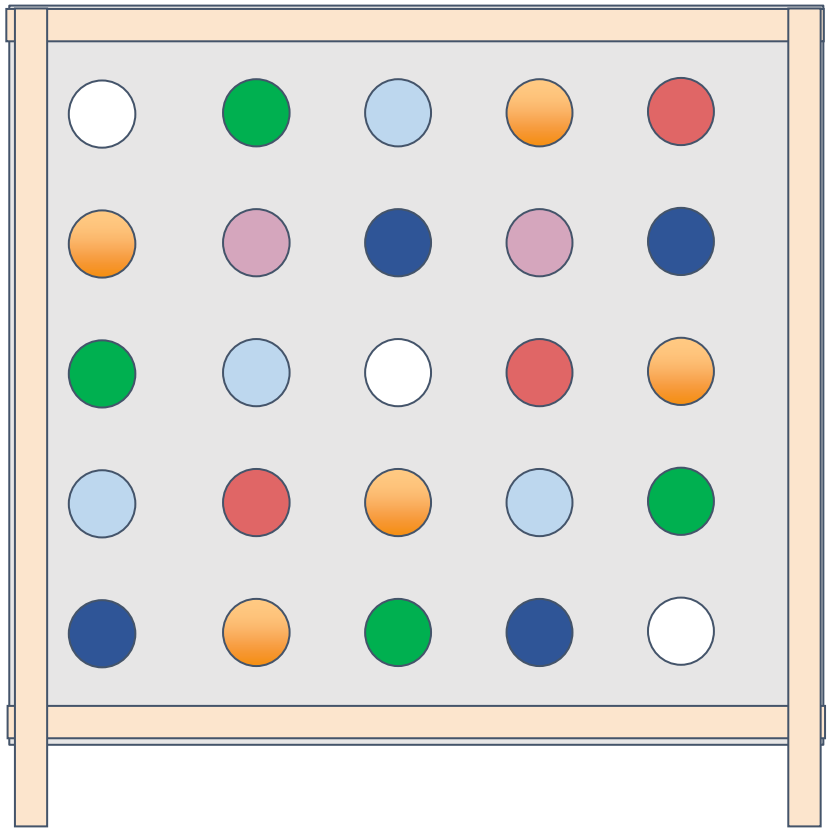
Исследование способности амадин к категоризационному обучению

Бусиничный пол 1



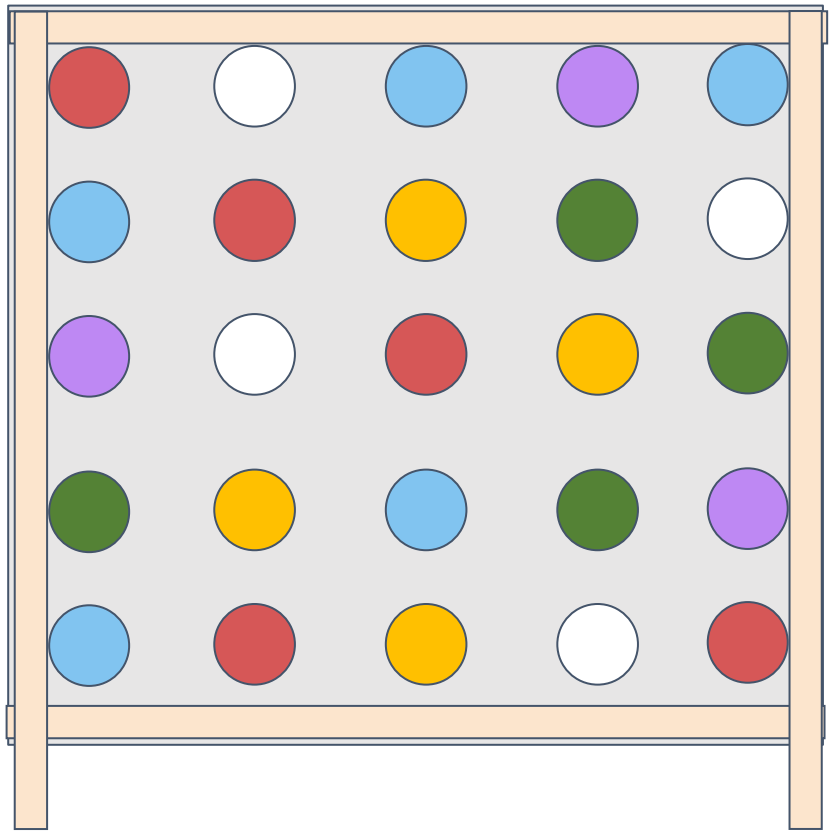
Пол, используемый при обучении

Бусиничный пол 2



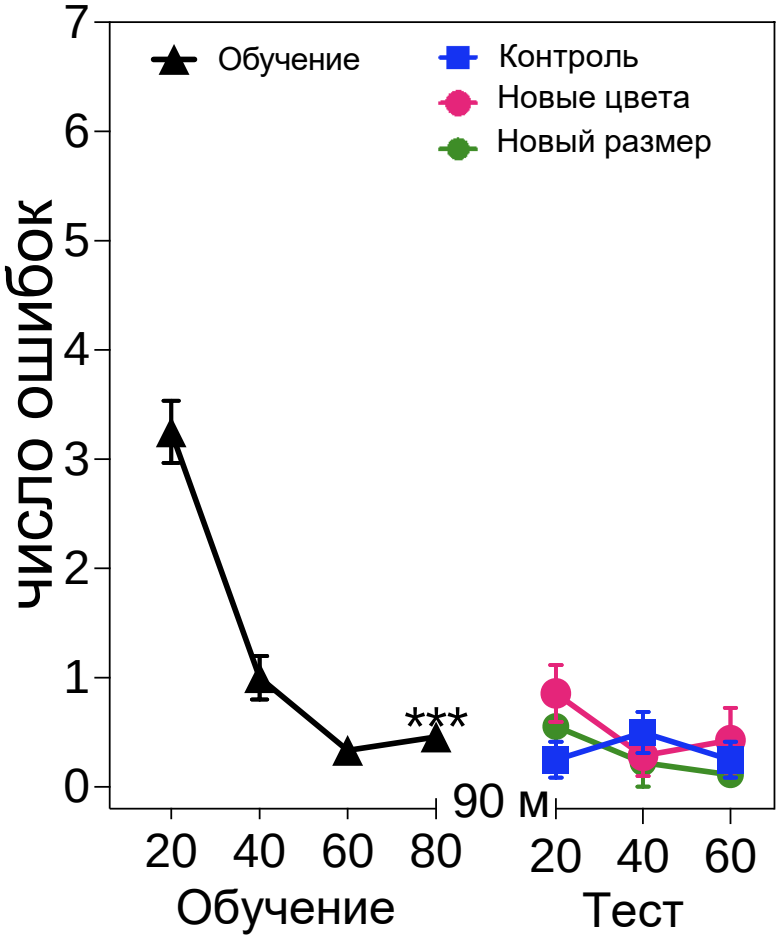
Другой цвет бусин

Бусиничный пол 3



Другой размер и цвет бусин

Исследование способности амадин к категоризационному обучению в модели бусиничного пола



В адаптированной для амадин модели зрительной категоризации при предъявлении объектов нового размера или цвета включение их в ранее сформированную категорию происходит успешно.

Однофакторный дисперсионный анализ ANOVA:
***P<.001 по сравнению с первым блоком обучения
Бусиничный пол 1: (n = 8)
Бусиничный пол 2: (n = 7)
Бусиничный пол 3: (n = 9)

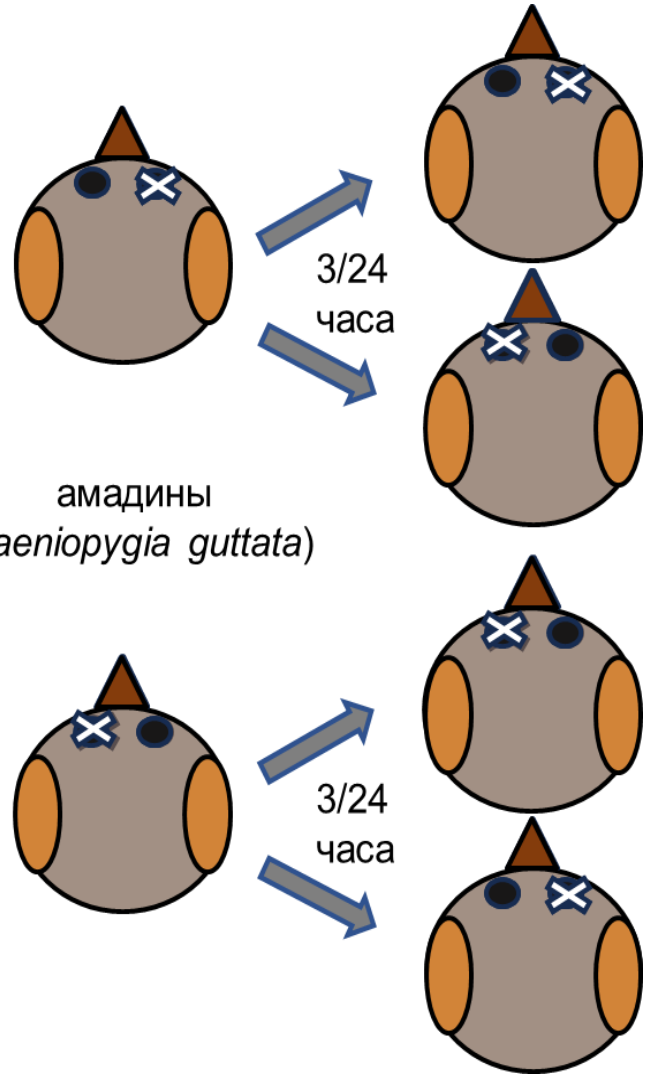
Схема эксперимента с амадинами

За 1 час до обучения и тестирования птицам закрывали правый или левый глаз.

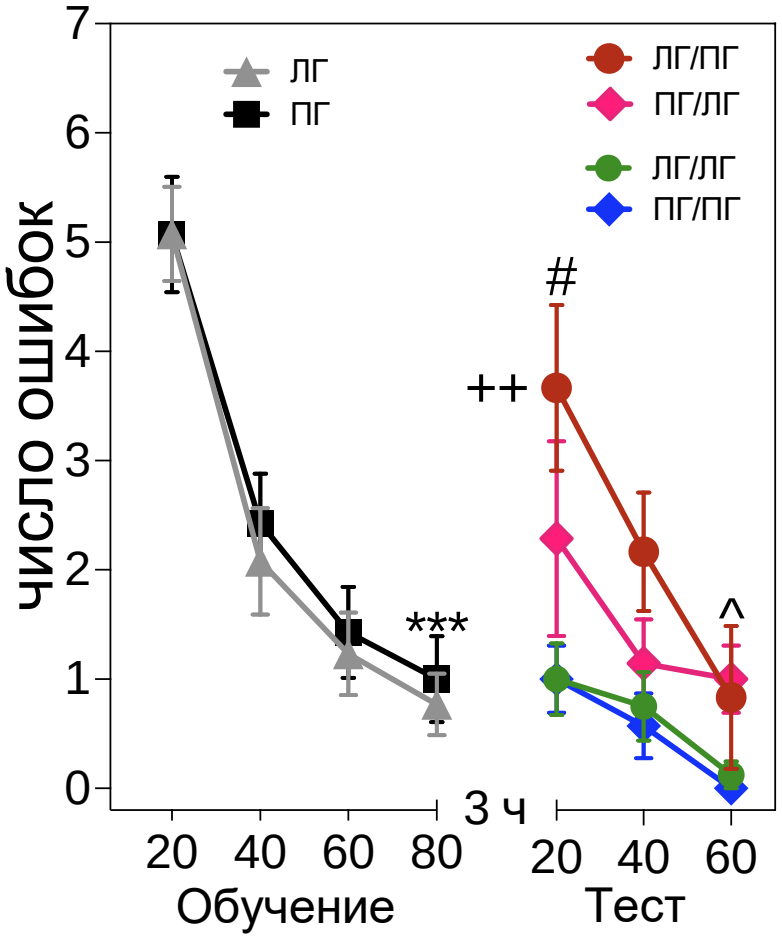
В эксперименте участвовали как самцы, так и самки.

Экспериментальные группы:
ЛГ/ПГ – закрыт левый глаз при обучении и правый при тестировании
ПГ/ЛГ – закрыт правый глаз при обучении и левый при тестировании

Контрольные группы:
ЛГ/ЛГ -- закрыт левый глаз при обучении и тестировании
ПГ/ПГ – закрыт правый глаз при обучении и тестировании.



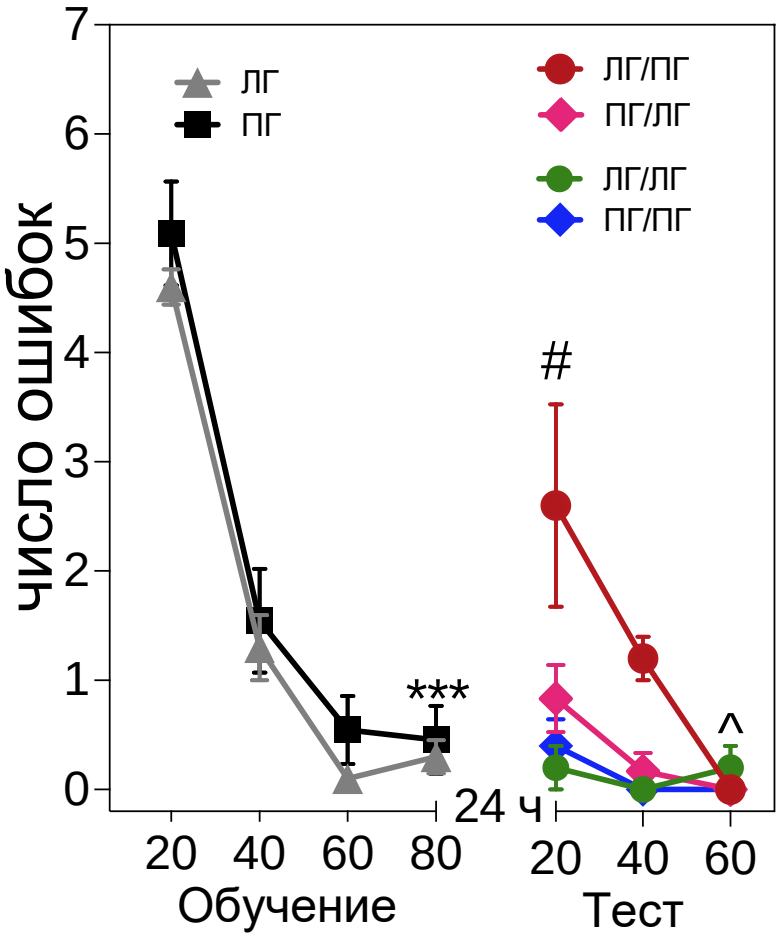
Монокулярное обучение и тестирование через 3 часа



Через 3 часа после обучения амадин опыт, приобретенный через систему правого глаза, недоступен для извлечения через левый глаз.

Двухфакторный дисперсионный анализ ANOVA, апостериорный критерий Тьюки, Шидака: ***P<.001 по сравнению с первым блоком обучения; #P<.05 у группы ЛГ/ПГ по сравнению с первым блоком тестирования в контрольной группе (ЛГ/ЛГ); ^P<.05 (ЛГ/ПГ) по сравнению с первым блоком теста. Т-тест: ++P<.01 (ПГ/ЛГ) по сравнению с последним блоком обучения. ЛГ/ПГ (n = 6), ПГ/ЛГ (n = 7), ЛГ/ЛГ (n = 7), ПГ/ПГ (n = 6)

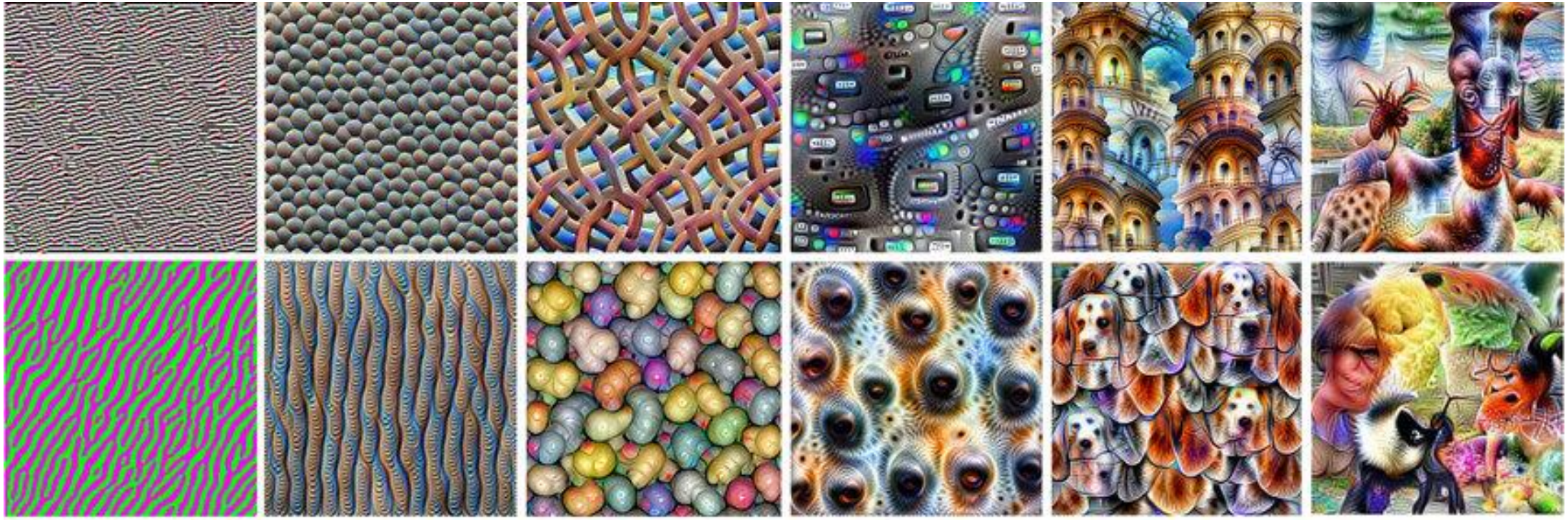
Монокулярное обучение и тестирование через 24 часа



Через 24 часа после обучения амадин наблюдается интерокулярный перенос приобретенного опыта, причем только от правого полушария к левому, но не в обратном направлении.

Двухфакторный дисперсионный анализ ANOVA, апостериорный критерий Тьюки, Шидака: ***P<.001 по сравнению с первым блоком обучения у каждой группы; #P<.05 (ЛГ/ПГ) в первом блоке тестирования по сравнению с контрольной группой (ЛГ/ЛГ); ^P<.05 (ЛГ/ПГ) по сравнению с первым блоком тестирования.
ЛГ/ПГ (n = 5), ПГ/ЛГ (n = 6), ЛГ/ЛГ (n = 5), ПГ/ПГ (n = 5)

Категоризация в искусственных системах

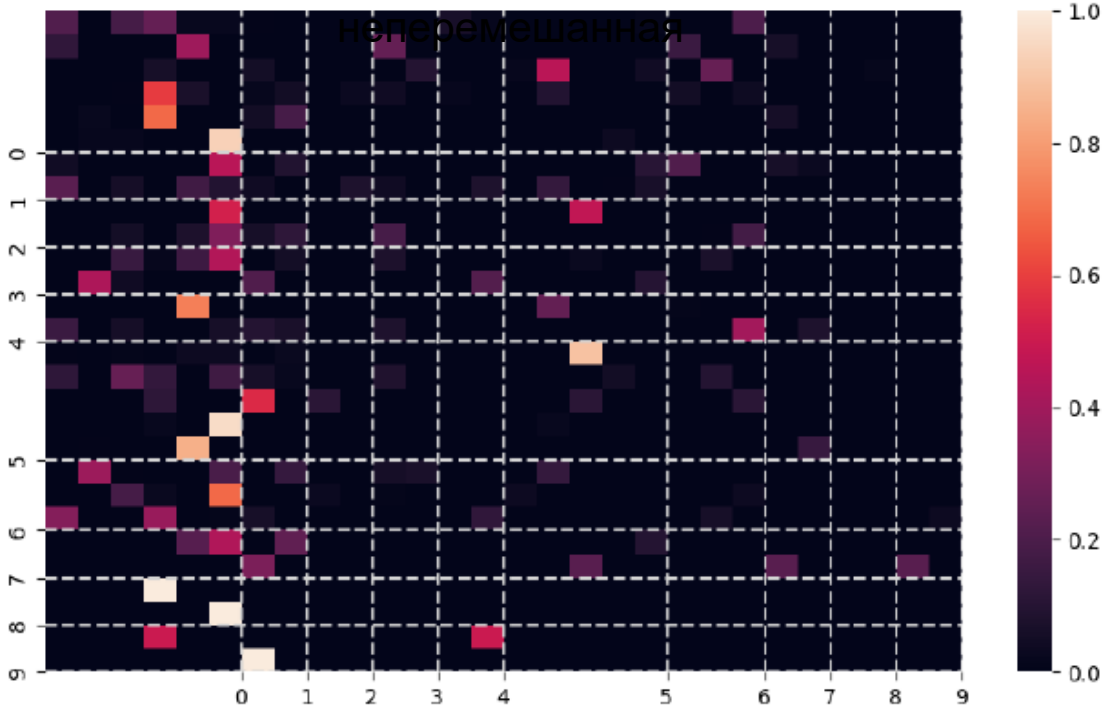


Edges	Textures	Patterns	Parts	Objects	Objects Interaction
(layer conv2d)	(layer mixed3a)	(layer mixed4a)	(layer mixed4b/4b)	(layer conv4d/4e)	(layer mixed5b)

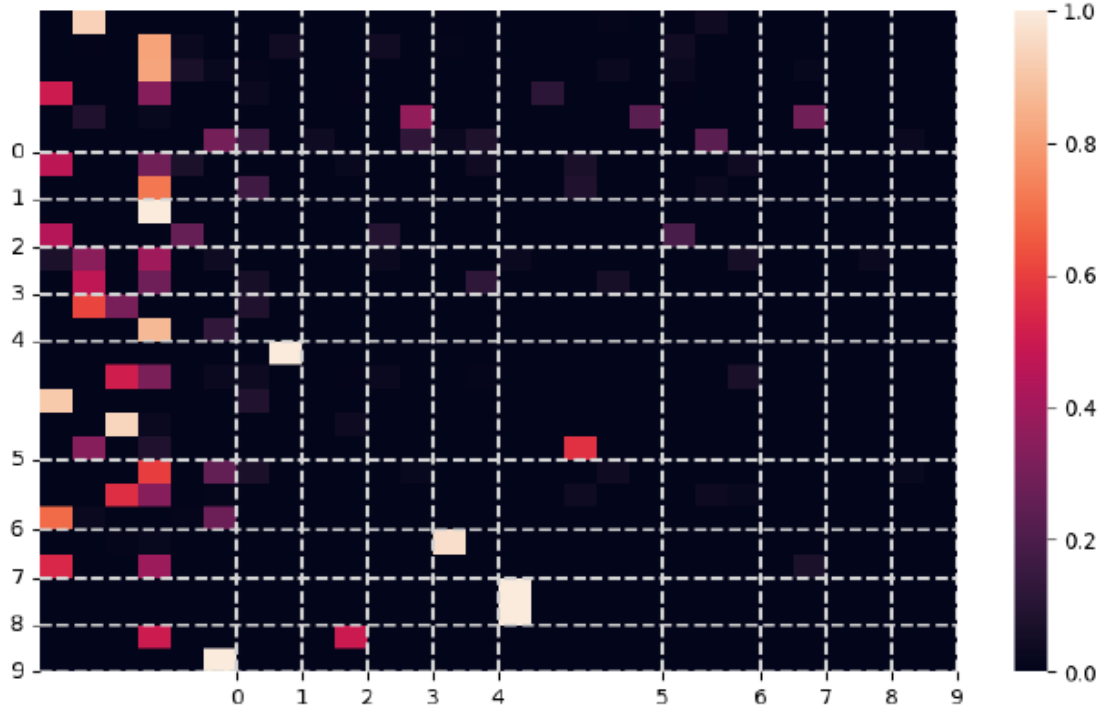
Franz Götz-Hahn et al., 2023. The Inter-Relationship Between Photographic Aesthetics and Technical Quality.

Результаты анализа последовательности клевания

Матрица перехода, неперемешанная



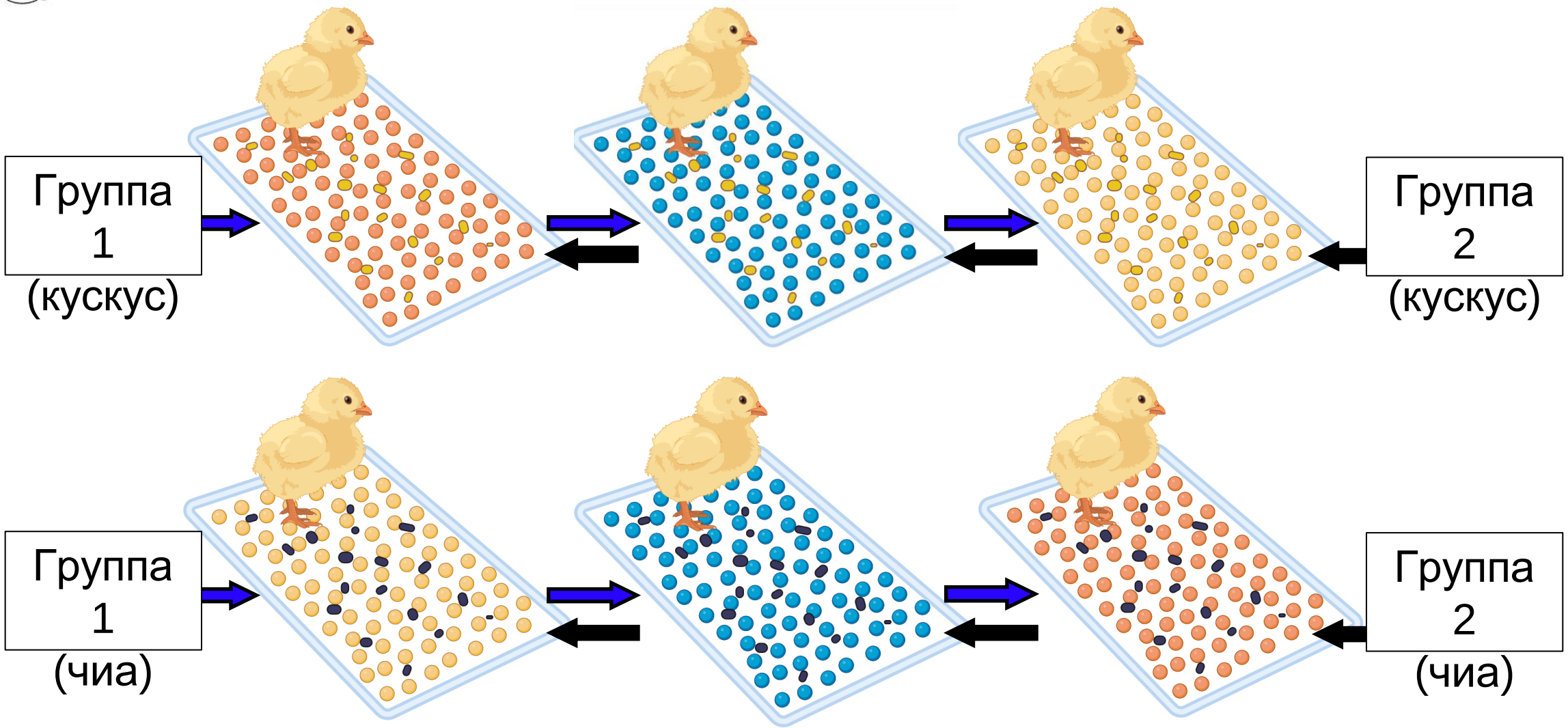
Матрица перехода, перемешанная



color	grain	blue	lime	white	black	yellow	golden	green	scarlet	red
code	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
frequency	0.85	0.03	0.004	0.02	0.01	0.06	0.03	0.01	0.0003	0.001

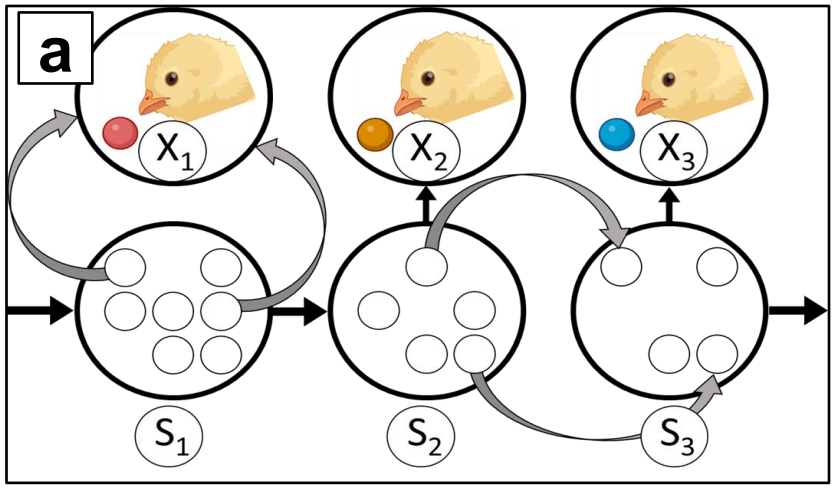
Тепловые карты (heatmap) матриц перехода для исходных и перетасованных последовательностей

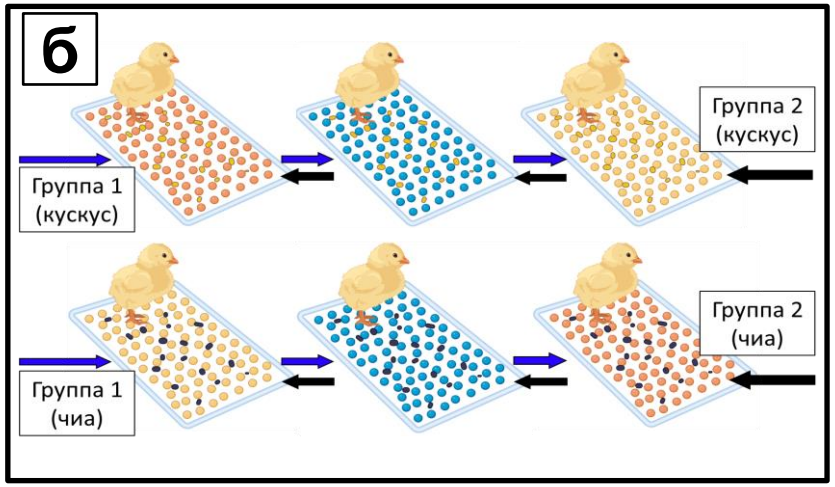
Обучение на монохромных полах



Обучение на монохромных полах

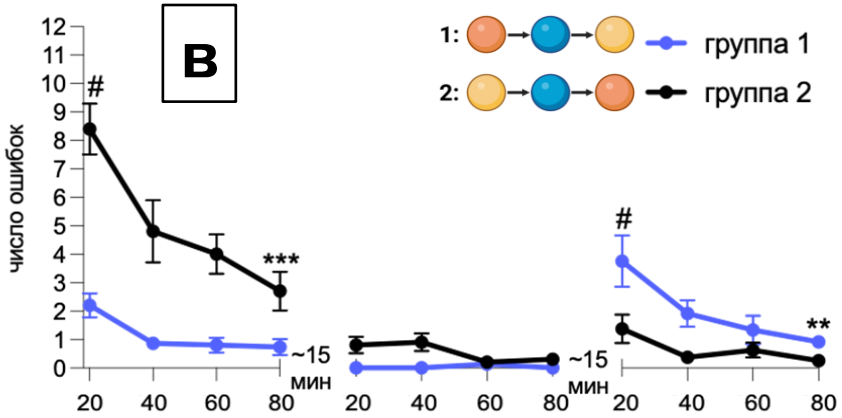
а – схема скрытой марковской модели, используемой в анализе наших данных, S_n – скрытое состояние, X_n – наблюдаемое состояние

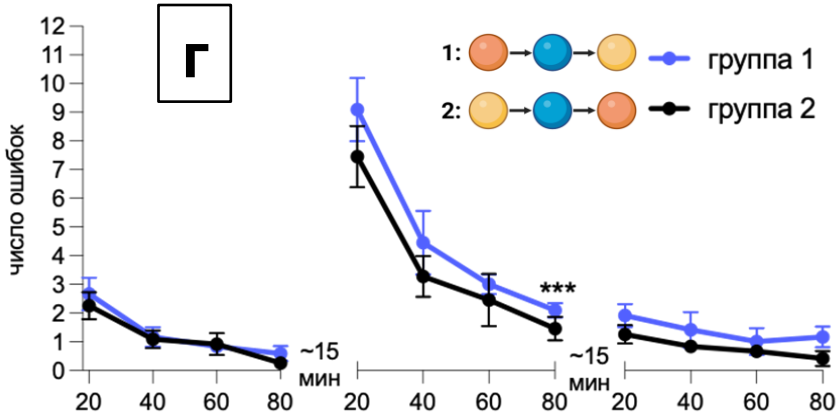




б – схема эксперимента с категоризационным обучением на монохромных полах.

в – с кускусом в качестве корма





г – с чиа в качестве корма

Результаты показали, что алгоритм формирования категории зависит от последовательности предъявленных цветов. Такое поведение может быть связано как с врожденными функциональными системами цыплят, так и с их индивидуальным опытом.

Двухфакторный дисперсионный анализ ANOVA, апостериорный критерий Тьюки, Шидака:
***P<.01 по сравнению с первым блоком обучения; #P<.05 в первом блоке тестирования по сравнению с контрольной группой

Выводы

1) Модель зрительного категоризационного обучения цыплят на бусиничном полу применима для обучения взрослых амадин.

2) Эксперименты на взрослых амадинах с использованием адаптированной модели демонстрируют их способность быстро формировать новые зрительные категории и включать в сформированную категорию объекты, отличающиеся по размеру и цвету.

3) Через 3 часа после обучения цыплят монокулярно приобретенный опыт недоступен для извлечения через систему другого глаза. У амадин опыт, приобретенный через систему левого глаза, недоступен для извлечения через правый глаз.

4) Через 24 часа после обучения у обоих видов птиц наблюдается интерокулярный перенос приобретенного опыта, причем только в направлении от системы левого глаза (правого полушария) к системе правого глаза (левому полушарию).

Выводы

5) По результатам обработки оригинальной последовательности клевания при помощи скрытой марковской модели, в ней обнаруживается закономерность, отличающая её от перемешанной последовательности.

6) По результатам обучения в модели монохромного «бусиничного пола», формирование категории зависит от последовательности предъявленных цветов.

Благодарности

Константин Владимирович Анохин

Анна Александровна Тиунова

Пузик Матвей Алексеевич

Арцатбанова Евгения Петровна

Евгений Александрович Дживеликян