

## БИОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

## BIOLOGICAL SCIENCES

DOI: 10.12731/2658-6649-2023-15-4-11-28

УДК 534.7



Научная статья

МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ ПОВЕДЕНЧЕСКИХ  
РЕАКЦИЙ У ЛАБОРАТОРНЫХ ЖИВОТНЫХ

*С.П. Драган, И.А. Веселовский,  
Д.Б. Коमारов, А.В. Богомолов*

**Обоснование.** Решение ряда прикладных задач требует экстраполяции медико-биологических эффектов воздействия экстремальных физических факторов с животных на человека по результатам экспериментальных исследований поведенческих реакций животных при воздействии таких факторов. Спецификой таких исследований является необходимость предварительного формирования необходимых поведенческих реакций у большой группы лабораторных животных, что требует существенных временных затрат.

**Цель.** Целью исследования являлось сокращение времени формирования поведенческих реакций у лабораторных животных при проведении экспериментальных исследований.

**Материалы и методы.** Экспериментальная установка состоит из пяти вертикально расположенных функционально самостоятельных одинаковых трехлучевых (Y-образных) радиальных лабиринтов с электрополем, датчиками регистрации перемещений животного, генераторами звуковых и световых стимулов, и блока управления. Животное может свободно перемещаться внутри всех трех лучей. В процессе эксперимента автоматически фиксируется время перехода животного из опасного (стартового) рукава в безопасный (целевой) рукав и количество совершаемых при этом ошибочных действий. Количество и длительность циклов и серий эксперимента задается программно, что позволяет регулировать время начала эксперимента автономно, без участия оператора. Для проверки работоспособности установки проведена серия экспериментов по обучению крыс реакции активного избегания в лаби-

ринте, использованы белые беспородные половозрелые крысы-самцы, весом 160-180 г в количестве 50 особей.

**Результаты.** На начальной стадии обучения (в течение двух недель) у крыс вырабатывался рефлекс избегания тока. В течение первой недели обучения вероятность достижения цели возросла с 0,64 до 0,85. На второй неделе обучения вероятность достижения цели составила 0,85-0,95. На первой неделе обучения среднее время достижения цели (время перехода в безопасный рукав) снижалось с 9 до 7 с. На второй неделе время достижения цели снизилось до 5-6 с. На второй неделе обучения некоторые крысы стали выполнять задание (избегать действия тока) до его включения, то есть меньше, чем за 5 с. Количество ошибочных действий во вторую неделю также снизилось. За три недели непрерывного обучения отобраны 30 животных с устойчивым поведенческим навыком (вероятность правильного действия 0,45-0,50), при временных затратах 4 часа в день на автономное (без участия экспериментатора) обучение.

**Заключение.** Разработанная методика продемонстрировала возможность эффективного обучения большой группы животных в сравнительно короткий срок. Отличительной особенностью разработанного аппаратно-программного комплекса является возможность реализации скрининговых исследований по исследованию ключевых показателей операторских функций с возможностью автономной работы экспериментальной установки.

**Ключевые слова:** медико-биологический эксперимент; аппаратно-программный комплекс; экспериментальная установка; обучение лабораторных животных; трехлучевой лабиринт; поведенческая реакция

**Для цитирования.** Драган С.П., Веселовский И.А., Комаров Д.Б., Богомолов А.В. Методика формирования поведенческих реакций у лабораторных животных // Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture. 2023. Т. 15, №4. С. 11-28. DOI: 10.12731/2658-6649-2023-15-4-11-28

Original article

## METHOD FOR FORMING BEHAVIORAL REACTIONS IN LABORATORY ANIMALS

*S.P. Dragan, I.A. Veselovsky,  
D.B. Komarov, A.V. Bogomolov*

**Background.** The solution of a number of applied problems requires extrapolation of the medical and biological effects of exposure to extreme physical

factors from animals on humans based on the results of experimental studies of the behavioral reactions of animals under the influence of such factors. The specificity of such studies is the need for preliminary formation of the necessary behavioral responses in a large group of laboratory animals, which requires significant time costs.

**Purpose.** The purpose of the study was to reduce the time of formation of behavioral reactions in laboratory animals during experimental studies.

**Materials and methods.** The experimental setup consists of five vertically located functionally independent identical three-beam (Y-shaped) radial labyrinths with an electric field, sensors for recording animal movements, generators of sound and light stimuli, and a control unit. The animal can move freely within all three rays. During the experiment, the time of the animal's transition from the dangerous (starting) arm to the safe (target) arm and the number of erroneous actions performed in this case are automatically recorded. The number and duration of cycles and series of the experiment is set by software, which allows you to adjust the start time of the experiment autonomously, without the participation of the operator. To test the operability of the installation, a series of experiments was carried out to teach rats the reaction of active avoidance in the maze, white outbred mature male rats weighing 160-180 g in the amount of 50 individuals were used.

**Results.** At the initial stage of training (during two weeks), the rats developed a current avoidance reflex. During the first week of training, the probability of achieving the goal increased from 0.64 to 0.85. In the second week of training, the probability of achieving the goal was 0.85-0.95. In the first week of training, the average time to reach the goal (time to go to the safe sleeve) decreased from 9 to 7 s. In the second week, the time to reach the goal decreased to 5-6 s. On the second week of training, some rats began to perform the task (to avoid the action of the current) before it was turned on, that is, in less than 5 s. The number of erroneous actions in the second week also decreased. For three weeks of continuous training, 30 animals with a stable behavioral skill (probability of correct action 0.45-0.50) were selected, with a time expenditure of 4 hours per day for autonomous (without the participation of the experimenter) training.

**Conclusion.** The developed technology has demonstrated the possibility of effective training of a large group of animals in a relatively short period of time. A distinctive feature of the developed hardware and software complex is the possibility of implementing screening studies to study key indicators of operator functions with the possibility of autonomous operation of the experimental setup.

**Keywords:** biomedical experiment; hardware-software complex; experimental setup; training of laboratory animals; three-beam maze; behavioral response

***For citation.** Dragan S.P., Veselovsky I.A., Komarov D.B., Bogomolov A.V. Method for Forming Behavioral Reactions in Laboratory Animals. Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture, 2023, vol. 15, no. 4, pp. 11-28. DOI: 10.12731/2658-6649-2023-15-4-11-28*

## **Введение**

При решении ряда прикладных задач медицинского обеспечения специалистов опасных профессий необходима информация о состоянии функциональных систем их организма в экстремальных условиях деятельности [11, 14]. С этой целью используют биологические модели, позволяющие экстраполировать медико-биологические эффекты воздействия экстремальных физических факторов с животных на человека по результатам экспериментальных исследований поведенческих реакций животных при воздействии таких факторов [5, 9, 15].

В качестве лабораторных животных при проведении таких исследований наиболее часто используют лабораторных крыс [1-3]. Для экспериментальных исследований поведенческих реакций лабораторных крыс применяют аппаратно-программные комплексы, направленные на изучение различных аспектов когнитивной деятельности: память, способности к обучению, решение задач без готового ответа, принятие решений и т.п. [8, 10, 13].

Спецификой экспериментальных исследований поведенческих реакций лабораторных животных является необходимость предварительного формирования необходимых поведенческих реакций у большой группы лабораторных животных (обучения животных), что требует существенных временных затрат [4, 7, 12]. Для сокращения таких затрат разработана методика формирования поведенческих реакций у лабораторных животных, основанная на применении оригинального аппаратно-программного комплекса экспериментального исследования поведенческих реакций лабораторных животных [6].

## **Цель исследования**

Целью исследования являлось сокращение времени формирования поведенческих реакций у лабораторных животных при проведении экспериментальных исследований.

## **Материалы и методы исследования**

Экспериментальная установка состоит из пяти вертикально расположенных функционально самостоятельных одинаковых трехлучевых (Y-образных) радиальных лабиринтов и блока управления. Каждый лабиринт

изготовлен в виде трех прямоугольных лучей (рукавов) с размерами: длина 16 см, ширина 10 см и высота от металлического пола до потолка 8 см. Высота лабиринта, включающего выдвижной в торцевую сторону поддон для сбора продуктов жизнедеятельности животного, составляет 12 см. В торцевой стенке каждого луча установлена дверь для посадки и изъятия животного. Животное может свободно перемещаться внутри всех трех лучей. Дверцы изготовлены со смотровым окном. Каждый рукав лабиринта оснащен выдвижным съемным полом (электрополом), состоящим из круглых металлических стержней диаметром 5 мм с расстоянием 1 см между их краями. Внешний вид установки показан на рис. 1.



А



Б

**Рис. 1.** Внешний вид экспериментальной установки, А – в статическом состоянии, Б – в процессе эксперимента

Секции электропола выполнены таким образом, чтобы вода или продукты жизнедеятельности животных во время тестирования или уборки не замыкали стержни между собой. Внутри рукавов лабиринта отсутствуют выступы, площадки или отверстия, позволяющие крысе избежать действия электрического тока. Каждый электропол оснащен разъемом для подключения кабеля электропитания.

Блок управления, расположенный сверху над лабиринтами (рис. 1), обеспечивает коммутацию светового и звукового условных сигналов, а

также величину напряжения, длительность и скважность импульсов, подаваемых на секции электропола независимо для каждого из лабиринтов, в соответствии с алгоритмом, заданным оператором установки с помощью программного интерфейса.

Каждый канал генератора стабилизированного напряжения подключен к соответствующему лабиринту, содержащему три секции электропола. Заданные в диапазоне 20-90 В значения напряжения для каждого лабиринта в течение эксперимента поддерживаются автоматически при помощи многоканальной системы отрицательной обратной связи.

Блок управления включает:

- пятиканальный генератор постоянного напряжения с независимой регулировкой напряжения по каждому из каналов;
- систему обратной связи для автоматической стабилизации напряжения на электродах электропола;
- датчики регистрации (фотодиоды) перемещений животных и их местоположение в каждом рукаве лабиринта;
- генератор импульсов напряжения «бегущая волна» с периодом от 0,1 до 5 с, регулируемой длительностью импульсов от 8 до 500 мс, скважностью от 0 до 500 мс и ограничителем силы тока (не более 5 мА);
- регистратор напряжения на электрополах каждого лабиринта с непрерывным отображением на дисплее подключенного компьютера.

При этом значение напряжения и длительность действия тока для каждого лабиринта устанавливает оператор, используя программный ползунковый регулятор блока управления.

Звуковой условный стимул формируется при помощи динамиков, установленных на каждом этаже лабиринта, на частоте 1 кГц при уровне 70-80 дБ: его длительность и уровень регулируются программно.

Освещение рукавов лабиринта осуществляется светодиодами, установленными на расстоянии 1-1,5 см от торцевой дверцы, уровень освещенности устанавливается программно. В зависимости от настроек блока управления возможны два варианта освещения лабиринта, позволяющие вырабатывать два различных условных рефлекса:

1 вариант. После размещения крысы в лабиринте перед подачей безусловного сигнала (электрическое напряжение) включается яркий свет в опасном рукаве лабиринта и выключается освещение в безопасном рукаве. После достижения крысой цели свет в лабиринте выключается.

2 вариант. После размещения крысы в лабиринте перед подачей безусловного сигнала включается яркий свет в безопасном рукаве лабиринта

и отсутствует освещение в опасных рукавах. После достижения крысой цели свет в лабиринте выключается.

Установка оборудована автономным источником питания (аккумулятор с выходным напряжением 12 В), также может работать от сети электропитания. Продолжительность автономной работы установки от внутреннего источника питания составляет не менее 12 часов (при соотношении: режим «Ожидание» 11 часов, режим «Работа» 1 час). Время полного заряда аккумулятора составляет 8 часов. В составе установки имеется блок мониторинга состояния аккумуляторной батареи с выдачей информации об уровне заряда аккумулятора.

Для контроля месторасположения крыс в каждом рукаве лабиринта установлены фотодиоды – датчики регистрации перемещений. Датчики, 12 штук (6 пар: излучатель и приемник), установлены равномерно по длине рукава так, чтобы регистрировать появление крысы в плоскости сечения, соединяющего две пары датчиков, расположенные на противоположных стенках лабиринта. Каждые две пары датчиков установлены на высоте 2 и 4 см. Применение двух пар датчиков, установленных на разной высоте относительно электропола обусловлено «эффектом хвоста»: крыса может находиться в центре лабиринта, а хвостом замыкать одну пару датчиков в соседнем лабиринте. Чтобы не происходило ложного срабатывания датчиков в лабиринте установлены две пары, то есть четыре датчика в одном сечении рукава. При таком размещении датчиков ложного срабатывания не происходит. Частота опроса состояния датчиков составляет 1 кГц.

В процессе эксперимента автоматически фиксируется время перехода животного из опасного (стартового) рукава в безопасный (целевой) рукав, то есть от момента включения условного раздражителя до срабатывания датчиков в целевом рукаве.

Определение номера «стартового» рукава для каждого лабиринта осуществляется автоматически перед включением стимула путем опроса датчиков. Если все датчики открыты (животное находится в центральной зоне лабиринта), то «стартовым» рукавом может быть любой. Если есть замкнутая пара датчиков, то «стартовым» рукавом лабиринта считается тот, в котором наибольшее количество замкнутых датчиков; при равном количестве замкнутых датчиков «стартовым» рукавом является любой из двух.

Регистрация перехода животного в рукав лабиринта осуществляется на основании последовательности срабатывания пар датчиков. Первые две пары от входа в рукав датчиков (Д1) имеют условный номер 1, вторые от

входа две пары датчиков Д2, третьи две пары – Д3, каждая из них может находиться в состоянии логического 0 или 1.

Для определения качества выполнения навыка регистрируется количество ошибочных действий, совершенных крысой во время эксперимента. Ошибочным считается действие – заглядывание, частичный или полный заход в любой опасный рукав лабиринта (где действует электрическое напряжение) до захода в безопасный рукав и выключения тока.

Для обеспечения наглядности процесса обучения и хода эксперимента предусмотрена визуализация месторасположения крысы и индикация наличия напряжения в каждом рукаве лабиринта на экране монитора компьютера с установленным разработанным программным обеспечением, который подключается к установке при помощи канала связи Wi-Fi.

Таким образом, алгоритм управления установкой позволяет реализовать несколько вариантов комбинаций стимулов для выработки различных условных рефлексов у крыс. Перед размещением животных в лабиринте во всех рукавах отключены все источники света.

1. Обеспечивается подача условного раздражителя (звук) одновременно для всех этажей лабиринта. В «безопасном» рукаве лабиринта включается яркий сигнальный свет, в «опасных» рукавах свет отсутствует. Через определенное время, заданное экспериментатором, происходит отключение звукового стимула и подача условного раздражителя (электрического напряжения) на электропол в «опасных» рукавах лабиринта.
2. Обеспечивается подача условного раздражителя (звук) одновременно для всех этажей лабиринта. В «опасных» рукавах лабиринта включается яркий сигнальный свет, в «безопасном» рукаве свет отсутствует. Через определенное время, заданное экспериментатором, происходит отключение звукового стимула и подача безусловного раздражителя – электрического напряжения – на электропол в опасных рукавах лабиринта.
3. Обеспечивается подача условного раздражителя (свет) для «опасных» рукавов лабиринта, в «безопасном» (целевом) рукаве свет отсутствует. Через заданное время на электропол «опасных» рукавов лабиринта происходит подача безусловного раздражителя – электрического напряжения.
4. Обеспечивается подача условного раздражителя (свет) для «безопасного» рукавов лабиринта, в «опасных» свет отсутствует. Через заданное время на электропол «опасных» рукавов лабиринта происходит подача безусловного раздражителя – электрического напряжения.



При реализации каждой комбинации время действия напряжения задается программно, а после достижения крысой цели или истечения времени выполнения теста, лабиринт возвращается в исходное (обесточенное и неосвещенное) состояние.

В работе установки предусмотрены синхронный и асинхронный режимы работы. При синхронном режиме подача условных и безусловных стимулов (цикл) осуществляется одновременно для всех (пяти) лабиринтов, начало нового цикла определяется по возвращению в исходное состояние всех лабиринтов установки либо по истечению межстимульного интервала для всех лабиринтов. При асинхронном режиме начало нового цикла определяется индивидуально для каждого лабиринта по возвращению в исходное состояние либо истечению межстимульного интервала, заданного программно.

Количество циклов и их длительность, а также количество серий эксперимента задается программно. Также в работе установки предусмотрен режим отложенного старта начала работы, что позволяет регулировать время начала эксперимента автономно, без участия оператора.

Определение достижения крысой цели (заход в целевой рукав лабиринта) осуществляется при помощи определения ее месторасположения. Событие «крыса вошла в рукав лабиринта – цель достигнута» фиксируется, если каждые две пары датчиков в целевом рукаве лабиринта последовательно с Д1 до Д3 изменяют состояние с 0 на 1 и сохраняют его не менее 0,1 с, или если каждые две пары датчиков с Д1 по Д3 последовательно изменяют состояние с 0 на 1, а затем Д1 возвращается в состояние 0. При этом в других рукавах все датчики должны иметь состояние 0.

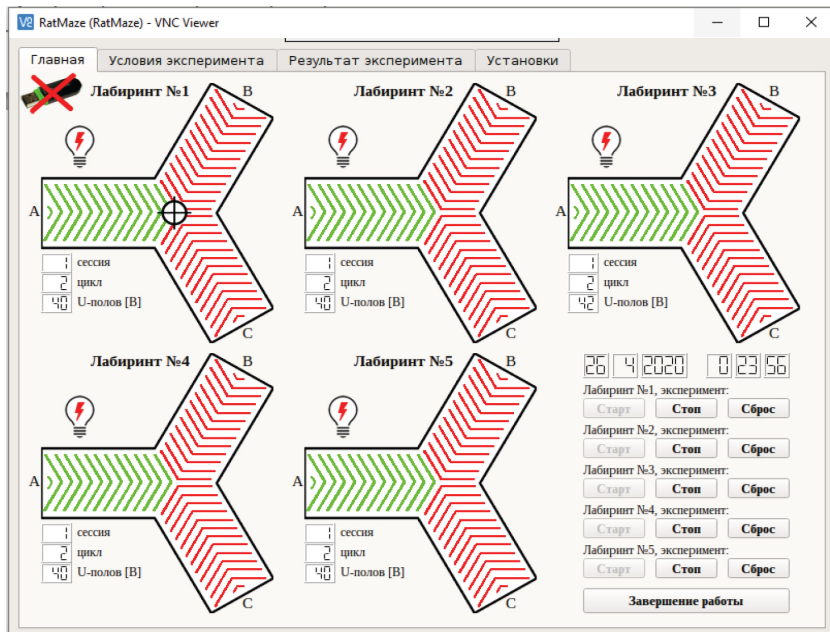
Цель считается достигнутой, когда в целевом рукаве лабиринта состояние датчиков Д1, Д2 и Д3 принимает любое значение (0 или 1, но хотя бы одна двойная пара должна быть в состоянии 1), и при этом в других рукавах все пары датчиков имеют состояние 0. Время достижения цели фиксируется с точностью 0,1 с.

Для работы с установкой разработано программное обеспечение «RatMaze», которое позволяет:

- устанавливать и оперативно изменять условия эксперимента (количество циклов и экспериментов, параметры условных и безусловных стимулов, режим работы);
- в реальном времени осуществлять индикацию на мониторе положения крыс и состояние рукавов лабиринта («опасный» или «безопасный») в ходе эксперимента во всех лабиринтах.

- осуществлять сохранение и документирование информации, чтение данных и служебной информации, а также представление результатов в формате MS Excel.

На рис. 2 и 3 представлены экранные формы главного меню программы и меню установки параметров экспериментальной установки.



**Рис. 2.** Главное меню программы «RatMaze» с индикацией месторасположения крысы, безопасного и опасных рукавов лабиринта

Для проверки работоспособности установки проведена серия экспериментов по обучению крыс реакции активного избегания в лабиринте. Для этого использованы белые беспородные половозрелые крысы-самцы, весом 160-180 г в количестве 50 особей. Проведение исследований осуществляли с соблюдением необходимых этических норм и правил, описанных в документах: правила лабораторной практики Хельсинкской декларации (2000); правила Европейской Конвенции ETS 123; нормы обращения с животными использованы на основе стандартных операционных процедур. Крысы были закуплены в одном питомнике и содержались в идентичных условиях.

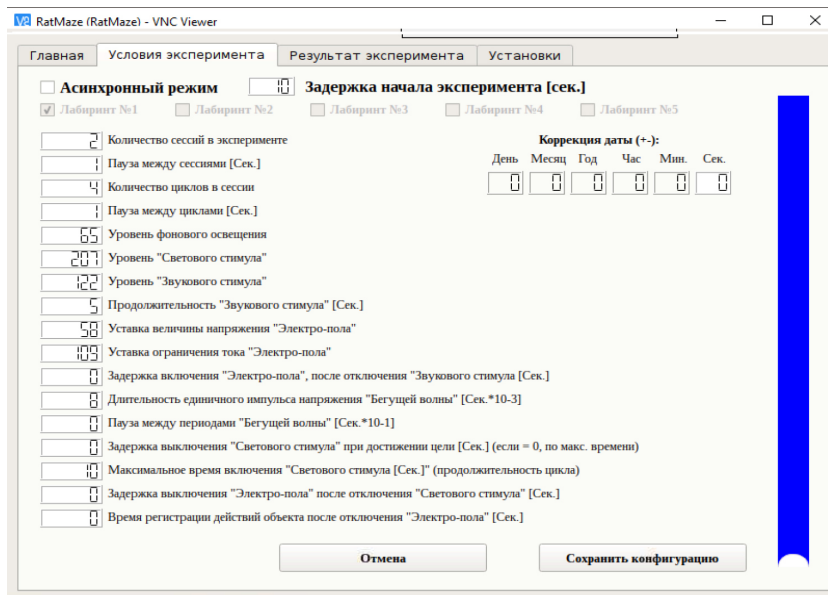


Рис. 3. Вкладка «Условия эксперимента» меню программы «RatMaze»

Статистическая обработка данных осуществлялась с помощью пакета прикладных программ Statistica 10.0 (StatSoft, USA).

### Результаты исследования

До воздействия исследуемого фактора у крыс вырабатывали инструментальные электрооборонительные запаздывающие рефлексы избегания со следующими характеристиками: условный сигнал – звуковой щелчок интенсивностью 80 дБ, длительностью 1 с; безусловное подкрепление – импульсное электрическое напряжение «бегущая волна» напряжением 30 В длительностью 20 с, длительность одиночного импульса – 8 мс, скважность импульсов – 0,1 с; длительность запаздывания подкрепления относительно условного сигнала (щелчка) – 5 с; безопасный (целевой) рукав – темный, яркость «опасных» рукавов – 80 условных единиц (% от максимальной освещенности), межстимульный интервал составлял 30 с.

Процедура выработки рефлекса активного избегания сводилась к следующему:

1. Одновременно пять крыс размещали в пяти лабиринтах установки в условиях освещения всех его рукавов.

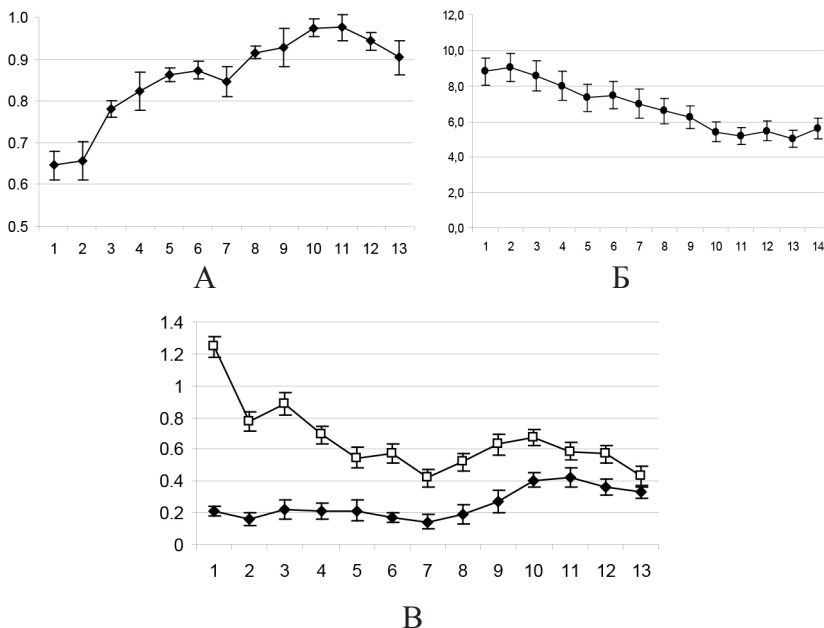
2. После знакомства с обстановкой (1-3 с) подавался условный стимул (звуковой сигнал), при этом в безопасном рукаве выключался свет.

3. Через 5 с на пол в два освещённых рукава подавалось электрическое напряжение.

Правильная условно-рефлекторная реакция сводилась к избеганию действия тока, то есть к перемещению животного в темный рукав после подачи электрического напряжения.

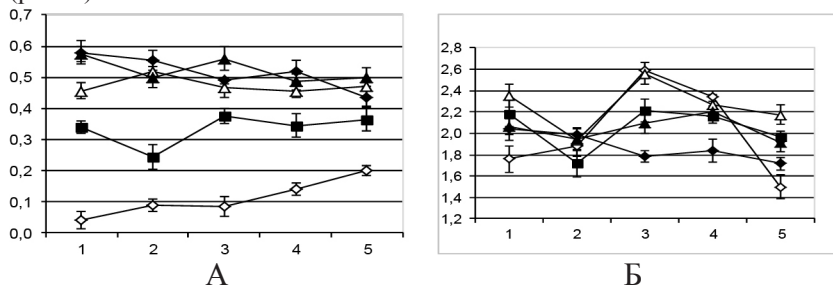
Эту процедуру повторяли 20 раз для каждой крысы в один день за один сеанс. Каждый цикл длился 25 с. Время между циклами составляло 30 с. Время обучения одной крысы за один день (один сеанс) составляло 20 минут. Всего 50 крыс обучали в течение трех недель без перерывов.

На рис. 4 приведены графики средних значений регистрируемых показателей (вероятность и время достижения цели), а также количество ошибочных действий по всей выборке (50 крыс) при обучении.



**Рис. 4.** Динамика обучения крыс, по осям абсцисс – дни проведения обучения, по осям ординат: А – вероятность достижения цели; Б – среднее время достижения цели, с, планки погрешности – стандартная ошибка; В – среднее количество ошибочных действий, темный треугольник – до действия тока, светлый квадрат – после действия тока

На третьей неделе обучения были сформированы 5 групп животных по 10 особей в каждой, которые демонстрировали следующие результаты (рис. 5).



**Рис. 5.** Характеристики реакции активного избегания у крыс различных групп, по оси абсцисс – дни проведения эксперимента, по оси ординат: А – вероятность достижения цели, Б – время достижения цели, светлый ромб – группа 1, темный квадрат – группа 2, светлый треугольник – группа 3, темный треугольник – группа 4, темный ромб – группа 5

### Обсуждение

На начальной стадии обучения (в течение двух недель) у крыс вырабатывался рефлекс избегания тока. На рис. 4а показан график изменения вероятности достижения крысой цели за время действия напряжения: приведены средние значения данных, полученных на 50 крысах. В течение первой недели обучения вероятность достижения цели возросла с 0,64 до 0,85. На второй неделе обучения вероятность достижения цели составила 0,85-0,95. На рис. 4б показаны средние значения времени достижения цели, разброс – стандартная ошибка (ошибка среднего арифметического). На первой неделе обучения среднее время достижения цели (время перехода в безопасный рукав) снижалось с 9 до 7 с. На второй неделе время достижения цели снизилось до 5-6 с, причем некоторые крысы стали выполнять задание (избегать действия тока) до его включения, то есть меньше, чем за 5 с. Количество ошибочных действий во вторую неделю также снизилось (рис. 4в).

У групп 3-5 (30 животных) вероятность достигнуть цели в ответ на условный сигнал до включения безусловного стимула составляла 0,45-0,50 (9-10 успешных заходов в «безопасные» рукава лабиринта из 20 ситуаций), а время достижения цели составляло 1,8-2,3 с (рис. 5). Эти значения незначительно колебались в течение недели, что свидетельствует об устойчивости сформированного условного рефлекса. У групп 1 и 2 вероятность достижения цели была ниже и составляла до 0,20 у первой группы и от

0,27 до 0,38 – у второй группы. Время достижения цели соответствовало показателям в группах 3-5. Причем во всех группах отсутствовали ошибочные действия.

Таким образом, за три недели непрерывного обучения при описанных выше параметрах были отобраны 30 (из 50) животных с устойчивым поведенческим навыком (вероятность правильного действия 0,45-0,50), при временных затратах 4 часа в день на автономное (без участия экспериментатора) обучение.

### **Заключение**

Разработанная методика продемонстрировала возможность эффективного обучения большой группы животных в сравнительно короткий срок, что важно для экспериментальных исследований в интересах экстраполяции медико-биологических эффектов воздействия экстремальных физических факторов с животных на человека. Отличительной особенностью разработанного аппаратно-программного комплекса является возможность реализации скрининговых исследований ключевых показателей операторских функций (время и вероятность достижения поставленной цели) с использованием широкодоступной универсальной техники отечественного производства, с возможностью автономной работы экспериментальной установки.

**Заключение комитета по этике.** Исследование было проведено в соответствии с принципами положения Хельсинкской декларации Всемирной медицинской ассоциации (Declaration of Helsinki, and approved by the Institutional Review Board), требованиями ГОСТ 33216-2014 и одобрено комитетом по этике ГНЦ РФ – ФМБЦ им. А.И.Бурназяна ФМБА России (протокол № 08 от 21 марта 2022 г.)

**Информация о конфликте интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Информация о спонсорстве.** Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ РФ (грант НШ-122.2022.1.6).

### **Список литературы/References**

1. Andreeva I., Teliа, V. Features of skin microcirculation in rats of different sex and age. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 2022, vol. 14, no. 1, pp. 217-234. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2022-14-1-217-234>

2. Arestova I., Sharonova E., Kupriyanova M. Morphological features of spermatozoa of male white rats under experimental stress. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 2021, vol. 13, no. 2, pp. 225-236. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2021-13-2-225-236>
3. Bekker R., Bykov Y., Bykova A. On the biological role of choline in the human and higher animals bodies (review of the literature). *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 2021, vol. 13, no. 5, pp. 76-103. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2021-13-5-76-103>
4. Cravedi K. D., May M. D., Abettan J. A., Huckleberry K. A., Trettel S. G., Vuong C. V., Altman D. E., Gauchan S., Shansky R. M., Matson L. M., Sousa J. C., Lowery-Gionta E. G., Moore N. L. Response and recovery of endocrine, behavioral, and neuronal morphology outcomes after different traumatic stressor exposures in male rats. *Psychoneuroendocrinology*, 2021, no. 133, p. 105394. <https://doi.org/10.1016/j.psyneuen.2021.105394>
5. Dragan S. P., Bogomolov A. V., Kezik V. I. Analysis of the impedance characteristics of the respiratory system of animals and humans. *Russian Journal of Biomechanics*, 2020, vol. 24, no. 2, pp. 187-195. <https://doi.org/10.15593/RZhBiomeh/2020.2.06>
6. Dragan S. P., Veselovsky I. A., Komarov D. B., Bogomolov A. V. Hardware-software complex for experimental study of behavioral reactions of laboratory animals. *Instruments and technique of experiment*, 2021, no. 6, pp. 131-132. <https://doi.org/10.31857/S0032816221060082>
7. Einat H., Ezer I., Kara N. Z., Belzung C. Individual responses of rodents in modeling of affective disorders and in their treatment: prospective review. *Acta Neuropsychiatrica*, 2018, vol. 30, no. 6, pp. 323-333. <https://doi.org/10.1017/neu.2018.14>
8. Grigoriev N. R., Li T., Li Sh. Yu. Cognitive abilities of rats in the operant behavior of active avoidance at various stages of ontogenesis. *Journal of Higher Nervous Activity*, 2014, vol. 64, no. 3, pp. 314-323. <https://doi.org/10.7868/S0044467714030058>
9. Ivanov I. V., Ushakov I. B. Basic approaches to the extrapolation of data from animals to humans in a radiobiological experiment. *Medical radiology and radiation safety*, 2020, vol. 65, no. 3, pp. 5-12. <https://doi.org/10.12737/1024-6177-2020-65-3-5-12>
10. Khotskin N. V. Carrying out and automation of the Morris Water Maze test in the conditions of an SPF vivarium. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*, 2015, vol. 19, no. 4, pp. 388-393. <https://doi.org/10.18699/VJ15.049>
11. Kislova Yu. V., Bogomolov A. V., Soloshenko N. V. Mathematical modeling of cardiovascular system in patients with hemorrhage and hypothermia. *Biomedical Engineering*, 2006, vol. 40, no. 4, pp. 167-170.

12. Notova S. V., Kazakova G. V., Marshinskaya O. V. Modern methods and equipment for assessing the behavior of laboratory animals (review). *Livestock and feed production*, 2018, vol. 101, no. 1, pp. 106-115.
13. Papes F, Nakahara T. S., Camargo A. P. Behavioral Assays in the Study of Olfaction: A Practical Guide. *Methods in Molecular Biology*, 2018, no. 1820, pp. 289-388. [https://doi.org/10.1007/978-1-4939-8609-5\\_21](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-8609-5_21)
14. Ushakov I. B., Bogomolov A. V. Diagnosis of human functional states in priority studies of domestic physiological schools. *Medical-biological and socio-psychological problems of safety in emergency situations*. 2021, no. 3, pp. 91-100. <https://doi.org/10.25016/2541-7487-2021-0-3-91-100>
15. Yakshieva Z., Kalonov R., Kaigorodov D., Kalinin E., Chepur S., Ivchenko E., Mustaev O. Problems of the biomedical technologies development and directions for their solution. *Journal of Biomimetics, Biomaterials and Biomedical Engineering*, 2021, vol. 53, pp. 1-9. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JBBBE.53.1>

### **ВКЛАД АВТОРОВ**

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи для публикации.

### **AUTHOR CONTRIBUTIONS**

The authors contributed equally to this article.

### **ДАнные ОБ АВТОРАХ**

**Драган Сергей Павлович**, д-р техн. наук, заведующий лабораторией

*Федеральное государственное бюджетное учреждение «Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна» ФМБА России*

*ул. Маршала Новикова, 23, г. Москва, 123098, Российская Федерация  
s.p.dragan@rambler.ru*

**Веселовский Игорь Алексеевич**, научный сотрудник

*Федеральное государственное бюджетное учреждение «Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна» ФМБА России*

*ул. Маршала Новикова, 23, г. Москва, 123098, Российская Федерация  
gniiivm-m@yandex.ru*



**Комаров Дмитрий Борисович**, научный сотрудник

*Федеральное государственное бюджетное учреждение «Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна» ФМБА России  
ул. Маршала Новикова, 23, г. Москва, 123098, Российская Федерация  
gniiivm.k@yandex.ru*

**Богомолов Алексей Валерьевич**, д-р техн. наук, профессор, ведущий научный сотрудник

*Федеральное государственное бюджетное учреждение «Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна» ФМБА России  
ул. Маршала Новикова, 23, г. Москва, 123098, Российская Федерация  
a.v.bogomolov@gmail.com*

#### **DATA ABOUT THE AUTHORS**

**Sergey P. Dragan**, Dr. Sc. (Engineering), Head of the Laboratory

*Burnazian Federal Medical Biophysical Center FMBA of Russia  
23, Marshal Novikov Str., Moscow, 123098, Russian Federation  
s.p.dragan@rambler.ru*

*SPIN-code: 3151-3067*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1576-3759>*

*Researcher ID: F-7870-4321*

*Scopus Author ID: 55055984400*

**Igor A. Veselovsky**, Researcher

*Burnazian Federal Medical Biophysical Center FMBA of Russia  
23, Marshal Novikov Str., Moscow, 123098, Russian Federation  
gniiivm-m@yandex.ru*

*SPIN-code: 3546-5511*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0098-3484>*

*Researcher ID: AAO-9989-2021*

*Scopus Author ID: 57201717991*

**Dmitriy B. Komarov**, Researcher

*Burnazian Federal Medical Biophysical Center FMBA of Russia  
23, Marshal Novikov Str., Moscow, 123098, Russian Federation  
gniiivm.k@yandex.ru*

*SPIN-code: 7283-8750*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4489-4395>*

*Researcher ID: AAN-1678-2020*

*Scopus Author ID: 5720215367*

**Aleksey V. Bogomolov**, Dr. Sc. (Engineering), Professor, Leading Researcher

*Burnazian Federal Medical Biophysical Center FMBA of Russia*

*23, Marshal Novikov Str., Moscow, 123098, Russian Federation*

*[a.v.bogomolov@gmail.com](mailto:a.v.bogomolov@gmail.com)*

*SPIN-code: 3795-0261*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7582-1802>*

*Researcher ID: F-7191-2013*

*Scopus Author ID: 55209544700*

Поступила 22.12.2022

После рецензирования 21.01.2023

Принята 30.01.2023

Received 22.12.2022

Revised 21.01.2023

Accepted 30.01.2023