

<https://doi.org/10.33647/2074-5982-21-4-27-38>



КАРТИРОВАНИЕ ПСИХОЭМОЦИОНАЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ ЖИВОТНЫХ И ДЕЙСТВИЯ ПСИХОТРОПНЫХ СРЕДСТВ ПО ПАРАМЕТРАМ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ВОКАЛИЗАЦИИ

Н.Н. Каркищенко¹, Ю.В. Фокин^{1,*}, Е.Б. Шустов^{1,2}

¹ ФГБУН «Научный центр биомедицинских технологий ФМБА России»
143442, Российская Федерация, Московская обл., Красногорский р-н, п. Светлые горы, 1

² ФГБУ «Научно-клинический центр токсикологии имени академика С.Н. Голикова ФМБА России»
192019, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Бехтерева, 1

Феномен ультразвуковой вокализации (УЗВ) характерен для различных лабораторных животных, широко используемых в биомедицинских исследованиях. Он тесно связан с особенностями функционального состояния центральной нервной системы животных, их психоэмоциональным статусом, особенностями реагирования на экстремальные воздействия, а также процессами зоосоциальной коммуникации. Указанные особенности позволили внедрить методику исследования УЗВ в практику биомедицинских исследований, ориентированных на моделирование различных заболеваний, патологических и саногенетических процессов, оценку эффективности психофармакологических средств. Целью настоящей статьи является раскрытие потенциала идентификации особенностей психофизических состояний лабораторных животных методом УЗВ. Представлена матрица идентификации эмоциональных состояний крыс на основе спектрального анализа их УЗВ.

Ключевые слова: психоэмоциональное состояние, центральная нервная система, ультразвуковая вокализация, частота, спектральная мощность, лабораторные животные

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Каркищенко Н.Н., Фокин Ю.В., Шустов Е.Б. Картирование психоэмоциональных состояний животных и действия психотропных средств по параметрам ультразвуковой вокализации. *Биомедицина*. 2025;21(4):27–38. <https://doi.org/10.33647/2074-5982-21-4-27-38>

Поступила 08.09.2025

Принята после доработки 20.10.2025

Опубликована 10.12.2025

MAPPING THE PSYCHOEMOTIONAL STATE OF ANIMALS AND EFFECTS OF PSYCHOTROPIC DRUGS BASED ON ULTRASONIC VOCALIZATION PARAMETERS

Nikolay N. Karkischenko¹, Yuriy V. Fokin^{1,*}, Evgeny B. Shustov^{1,2}

¹ Scientific Center of Biomedical Technologies of the Federal Medical and Biological Agency of Russia
143442, Russian Federation, Moscow Region, Krasnogorsk District, Svetlye Gory Village, 1

² Scientific and Clinical Center of Toxicology named after S.N. Golikov
of the Federal Medical and Biological Agency of Russia
192019, Russian Federation, St. Petersburg, Bekhterev Str., 1

The phenomenon of ultrasonic vocalization (USV) is characteristic of various laboratory animals, which are widely used in biomedical research. This phenomenon is closely linked to the functional state of animals' central nervous system, their psychoemotional status, response to extreme stimuli, and the processes

of zoosocial communication. These characteristics have allowed the introduction of USV research methods into biomedical research aimed at modeling various diseases, pathological and sanogenetic processes, and evaluating the efficacy of psychopharmacological agents. In this article, we set out to investigate the possibility of identifying the characteristics of the psychophysical state of laboratory animals using USV. A matrix for identifying the emotional states of rats based on spectral analysis of their USV is presented.

Keywords: psychoemotional state, central nervous system, ultrasonic vocalization, frequency, spectral power, laboratory animals

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

For citation: Karkischenko N.N., Fokin Yu.V., Shustov E.B. Mapping the Psychoemotional State of Animals and Effects of Psychotropic Drugs Based on Ultrasonic Vocalization Parameters. *Journal Biomed.* 2025;21(4):27–38. <https://doi.org/10.33647/2074-5982-21-4-27-38>

Submitted 08.09.2025

Revised 20.10.2025

Published 10.12.2025

Введение

Важной стороной биомоделирования различных физиологических, патологических и саногенетических процессов, действующих на организм человека, является динамическая оценка их влияния на психо-физическое состояние объектов моделирования (лабораторных животных). В связи с этим принципиально важным становится выбор оптимальных методик исследования, позволяющих проводить идентификацию, изучение особенностей не только типовых функциональных состояний животных (сон, пассивное бодрствование, активное бодрствование, поисково-исследовательская активность, локомоторная активность, эмоциональное реагирование, водно-пищевое и половое поведение, коммуникационное и зоосоциальное взаимодействие и др.), но и основные эмоциональные состояния и реакции (комфорт, удовольствие, тревога, напряжение, стресс, страх, агрессия, боль, голод, жажда и др.). В рамках действующей в настоящее время научной парадигмы доказательной медицины к таким методикам могут быть предъявлены требования биоэтичности и гуманного отношения к животным, высокой воспроизведимости, смысловой адекватности, согласованности с другими методами исследования, автономности проведения при минимально воз-

можном взаимодействии с исследователем, бесконтактной автоматической регистрации исследуемых показателей, их количественный характер, позволяющий проводить статистический анализ и математическое моделирование процессов, а также однозначной интерпретации и критериальных оценок полученных результатов [7]. Практически в полной мере этим требованиям соответствует методика оценки эмоционального состояния и зоосоциальной коммуникации животных путем анализа их ультразвуковой вокализации (УЗВ) [1, 6, 11, 16–19].

Ультразвук (УЗ) является собой упругие волны с частотами от 15–20 кГц ($(1,5-2,0) \times 10^4$ Гц) до 1 ГГц (10^9 Гц) и по физическим свойствам не отличается от воспринимаемого человеческим ухом слышимого звука. Физическая природа УЗ включает в себя механические, тепловые и физико-химические явления, вызывающие разнообразные и мощные биологические эффекты.

УЗ является высокоэффективным методом исследования различных веществ и явлений во многих областях физики, химии, биологии и медицины. Отражение УЗ-сигналов от препятствий используется в эхолотах, гидролокаторах и других устройствах, построенных на основе эффекта Доплера [23]. При интенсивностях

до 1–2 Вт/см² УЗ способен активизировать обменные процессы в органах и тканях, улучшать кровоснабжение. Более высокие интенсивности могут приводить к разрушению белков, гликолипопротеидов, что используется в хирургической практике и локальных воздействиях на ткани организма. Диагностическое значение УЗ методов широко известно — оно позволяет более тонко и с меньшим повреждением тканей в сравнении, например, с рентгеновским облучением обеспечивать диагностические процедуры с высокой разрешающей способностью.

Феномен ультразвуковой коммуникации у различных животных изучается с середины XX века. По своим возможностям она занимает промежуточное место между оптической и химической, но, в отличие от них, может действовать на большом расстоянии или в полной темноте, когда отсутствуют зрительные, тактильные и обонятельные контакты. Дальность передачи УЗ-сигналов определяется интенсивностью и частотой сигнала, акустическими свойствами среды и порогами слуха животного, принимающего этот сигнал [28].

УЗВ мышей характеризуется преобладанием частот в диапазонах 20–30 и 45–60 кГц [13, 25]. Для кроликов, мини-свиней и хомяков характерна УЗВ частотой 20–25 кГц, в меньшей степени — 35 кГц [10, 11]; также хомяки способны излучать сигналы частотой приблизительно 55 кГц. Основная частотная составляющая ультразвука макак-резусов, крыс и морских свинок лежит в диапазоне 30–50 кГц с пиком в области 37–42 кГц [22, 24]. Установлено, что в диапазоне ультразвуковых откликов животные общаются и «сообщают» друг другу о наличии угроз, опасности, дискомфортных состояниях, стресс-воздействиях и т.д. [14, 26].

К настоящему времени феномен УЗВ установлен для различных — мелких, средних и крупных — лабораторных животных,

а также человека. УЗВ животных изучена в обычных, комфортных условиях, а также при действии внешних факторов. С целью ее поведенческой интерпретации, приемлемой для доклинического изучения психофермакологических средств, необходимо создание системы анализа, позволяющей осуществлять диагностику и прогноз посредством преобразования частотно-спектральных характеристик УЗВ.

Целью настоящей статьи является раскрытие потенциала идентификации особенностей психофизических состояний лабораторных животных (крыс) методом ультразвуковой вокализации.

Материалы и методы

Информативные параметры УЗВ и выбор биомодели. УЗВ животных имеет свои информативные признаки в зависимости от вида, линии и возраста животных. С половой принадлежностью частотные и спектральные характеристики УЗВ связаны незначительно. В качестве наиболее оптимальной биомодели по показателям количества и однородности сигналов за единицу времени в настоящее время приняты лабораторные крысы.

Используемые в работе лабораторные животные получены из собственного поголовья ФГБУН НЦБМТ ФМБА России (Московская обл., г.о. Красногорск), а также из филиалов «Андреевка» (Московская обл., г.о. Солнечногорск) и «Столбовая» (Московская обл., г.о. Чехов) ФГБУН НЦБМТ ФМБА России. Основными объектами исследования явились крысы линии WAG/GY обоего пола половозрелого возраста (3–3,5 мес.). Также были исследованы крысы линий F344/Y, Aug/StoY, Aug/StoY, BY/Y, HY/Y, популяция бесшёрстных животных (всего 184 самца и 146 самок); мыши линии B10.GFP, хомяки линии BSto, морские свинки популяции цветных и альбиносов, кролики породы

Советская шиншилла, мини-свиньи светлогорской популяции, обезьяны *Macaca mulatta*. Результаты исследования УЗВ указанных видов животных представлены в работе [11].

Дизайн исследования подразумевал регистрацию и статистический анализ показателей УЗВ крыс в состоянии активного бодрствования, при воздействии стрессирующих факторов (голода, жажды, кратковременной боли, гипоксии, гипертермии, физических нагрузок), а также фармакологических средств с известным механизмом нейромедиаторного действия.

Регистрация и анализ УЗВ. УЗВ фиксировалась с помощью специальных микрофонов системы Sonotrack (“Metris B.V.”, Нидерланды). Оборудование позволяет регистрировать сигнал частотой от слышимого диапазона (15 кГц) до 100 кГц и записывать его в цифровом формате для дальнейшей обработки. Установка микрофонов происходила дистанционно, на расстоянии 20–25 см от головы животных. Частота дискретизации составляла 200 кГц. После удаления физических артефактов (мононотных шумов) осуществляли спектральный анализ ультразвука с использованием процедуры быстрого преобразования Фурье в частотной полосе 15–100 кГц с помощью пакета программ MATLAB-5.5 методом Уэлча (функция *pwelch*). Эпоха анализа составляла 10 мс, размерность быстрого преобразования Фурье (*Nfft*) — 2000 интервалов. В ходе анализа спектральную плотность мощности ультразвука (СПМ), излучаемого каждым животным, нормировали к СПМ фона окружающей среды, в результате получали вектор-строку изменений ультразвука, в котором находили максимум, приравнивая его к 100%, остальные значения приводили в соответствие с максимумом [12]. Таким образом, значения СПМ УЗВ выражались в виде безразмерных коэффициентов (КСПМ), рассчитанных как отношение СПМ к фону

окружающей среды, либо в процентном соотношении. После этого находились медианы по каждой частоте, учитывая все эпохи анализа в эксперименте для каждого животного и по группам. До начала эксперимента записывалась УЗВ животных, которая использовалась в качестве фоновых данных. Кроме спектральных характеристик нами определялся показатель интенсивности вокализации, равный количеству эпизодов ультразвуковых сигналов за 1 ч исследования [7]. Также программа предусматривает подсчёт площади под кривой по формуле: $A = \int_{a,b} f(x) dx$, где A — искомая площадь; $f(x)$ — функция; dx — дифференциал интеграла; $\int_{a,b}$ — определённый интеграл с известными пределами.

Моделирование функционального состояния животных в исследовании выполнялось методами кратковременного воздействия физических (гиперкапническая гипоксия, электрокожное воздействие болевого диапазона) и психологических (частичная иммобилизация, ситуационный стресс, связанный с помещением животного в незнакомую обстановку, моделирование агрессивности и ярости (тест «боя самцов») факторов [7, 19].

При гиперкапнической гипоксии экспериментальное животное помещается в герметичный стеклянный сосуд стандартной емкости. Концентрация CO_2 во вдыхаемой смеси составляет 4–5%, дефицит O_2 — 4,8–6%. Метод позволяет следить за поведением животного, регистрировать частоту дыхательных движений, а также фиксировать основной параметр — продолжительность жизни (критерием гибели служит момент полной остановки дыхания). В случае использования этой модели только для создания стрессового воздействия животное извлекается из-под колпака, не дожидаясь его гибели, при появлении первых признаков дискоординированного поведения.

Тест на электрокожное раздражение, вызывающее у крыс состояние тревоги, страха и болевого стресса, вплоть до шока,

осуществлялся в изолированной камере с отверстиями для воздухообмена, пол которой представляет собой металлические стержни, на которые подается пульсирующий ток такой величины, чтобы крыса не издавала звука в слышимом диапазоне (примерно 30–35 В). Стимуляцию осуществляли 10 мин, в течение которых крыса находилась под постоянным наблюдением.

Для проведения теста «боя самцов» животные парами помещались в клетку с электризованным полом, и в течение 5 мин записывалась их вокализация в обычном (комфортном) состоянии одним микрофоном у двух самцов одновременно. Затем в этой же клетке с помощью подачи тока (30–35 В), добившись агрессивного поведения самцов по отношению друг к другу, записывали их совместную УЗВ.

Частичную иммобилизацию (гипокинетический стресс) создавали путем помещения крысы на 2 ч в узкий пластиковый пенал с отверстием для дыхания, исключающий возможность каких-либо движений туловища в нем.

Формирование у животных состояния выраженного утомления проводилось на установке «ротарод» (горизонтальный врачающийся барабан). В ходе предварительного обучения животных выполнению методики подбиралась такая скорость вращения барабана (вал поднят на высоту 15 см от пола и покрыт мягким пористым материалом, диаметр вала — 7 см, скорость вращения — 1,5 об/сек), при которой животное может на нем удержаться 20–30 сек. После падения на токовую площадку животное, стимулированное электрическим током, запрыгивает на вал и в течение эксперимента передвигается на нем. Необходимость постоянно запрыгивать на вал способствует быстрому развитию утомления. При этом фиксируется время, спустя которое животное, несмотря на электрическую стимуляцию на токовой площадке, уже не может

запрыгнуть на вал [19]. УЗВ животных регистрировалась сразу после достижения стадии выраженного утомления.

Для решения одной из актуальных проблем современной психофармакологии, связанных с анализом категорий общности и различия в ряду психотропных средств, т.е. концепций психоунитропизма, применяется спектральный, в т.ч. кластерный, анализ, посредством которого удается выявить ряд количественных и качественных показателей, характеризующих влияние препаратов основных психотропных групп на функциональные состояния ЦНС [8].

Изменение психоэмоционального состояния животных с помощью введения фармакологических средств обеспечивалось применением следующих препаратов: транквилизатора бензодиазепиновой группы Диазепам (Релиум, Тархоминский фармацевтический завод «Польфа») в дозе 2 мг/кг; ноотропа с психоактивирующим действием Фенотропил («Щёлковский витаминный завод») в дозе 21 мг/кг; норадренергического стимулятора Атомоксетин (Страттера, «Eli Lilly») в дозе 1 мг/кг; центрального холинергического средства непрямого действия Галантамин («Канонфарма») в дозе 1 мг/кг. Дозы исследуемых препаратов соответствовали средним терапевтическим для людей с учетом коэффициентов видового переноса для лабораторных животных (для крыс — 5,9). Все исследуемые препараты вводились внутрижелудочно с помощью металлического зонда, однократно, в объеме 0,2–0,5 мл за 0,5–1 ч до начала исследования.

Статистическая обработка результатов исследования осуществлялась с помощью пакета прикладных программ «Анализ данных» процессоре электронных таблиц Microsoft Excel, а также специализированной программе Statistica v.10 методами частотного, дисперсионного, корреляционного, мультифакторного и кластерного анализа.

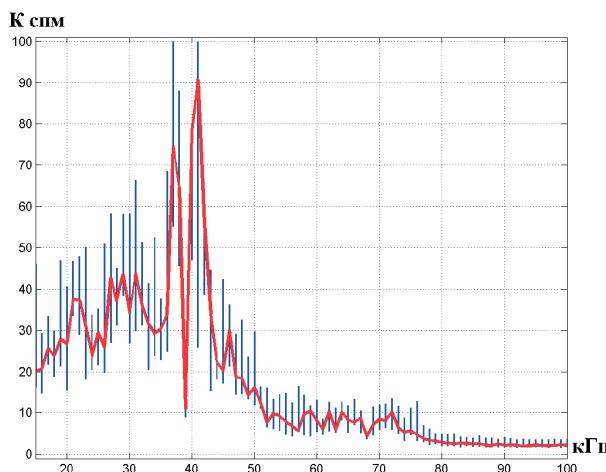


Рис. 1. УЗВ крыс в спокойном комфорtnом состоянии. По оси абсцисс — частота, кГц; по оси ординат — спектральная плотность мощности (Кспм). Синие линии — 95% доверительный интервал.

Fig. 1. USV of rats in a calm, comfortable state. The abscissa axis shows frequency, kHz; the ordinate axis shows spectral power density (Kcpm). Blue lines indicate the 95% confidence interval.

Результаты и их обсуждение

В состоянии психологического комфорта (спокойное бодрствование) картина УЗВ у половозрелых крыс линии WAG/GY характеризуется наличием доминантного пика УЗВ в частотном диапазоне 31–45 кГц (наиболее часто — 36–40 кГц) при отсутствии высокоамплитудных пиков в других частотных диапазонах (рис. 1).

При воздействии стрессовых факторов (например, электрокожное раздражение) отмечается появление высокоамплитудных ультразвуковых сигналов в диапазоне менее 30, 48–52 и 60–65 кГц. СПМ УЗВ в состоянии «боя самцов» характеризовалась ростом на несколько порядков в диапазонах 20–30 (максимальный пик — в области 22–23 кГц) и 45–70 кГц. При кислородном

Таблица. Влияние стрессовых факторов на спектральные характеристики УЗВ крыс (локализация доминантных пиков) [6]

Table. The influence of stress factors on the spectral characteristics of the USV of rats (localization of dominant peaks) [6]

Стресс-фактор	Частотные диапазоны (кГц)				
	Менее 20	20–30	31–45	45–75	Более 75
Комфорт			+++		
Ограничение подвижности		+++		+	
Гипоксия	++++	+++			
Электрокожное раздражение		++++		+++	
Бой самцов	++	++++		++	
Утомление				++	
Ситуационный стресс		+++		+	
Постстрессовое состояние	+	+	+	++	

Примечание: количество знаков «+» отражает амплитуду доминантного пика.

Note: number of “+” signs reflects the amplitude of the dominant peak.

голодании СПМ УЗВ крыс снижалась практически на всем исследуемом частотном диапазоне, кроме промежутка до 20 кГц. Наибольшее снижение наблюдалось в «диапазоне комфорта». Максимальные значения СПМ обнаружены на частоте около 18 кГц. Дополнительный пик обнаружен в области 25–26 кГц. Наблюдаемый эффект, по всей видимости, связан с сильнейшим стрессовым влиянием гипоксии, вызывающим приближение УЗВ крыс к слышимому диапазону (и, вероятно, «крику о помощи»), что абсолютно не характерно для их обычного состояния [6, 19, 21].

Данные о перестройке частотных характеристик максимальных пиков УЗВ под влиянием стрессовых факторов представлены в таблице. Появление высокоамплитудных пиков УЗВ в частотном диапазоне 20–30 кГц свидетельствует об острых стрессовых воздействиях, причем чем выраженнее стресс, тем «громче» происходит вокализация в этом диапазоне. Этот диапазон может быть охарактеризован как отражающий тревогу, напряжение (или умеренный дискомфорт при низких амплитудах УЗВ). Вовлечение в УЗВ частотного диапазона менее 20 кГц свидетельствует об экстремальном, опасном для жизни состоянии животного. Появление основного или дополнительных пиков в диапазоне 45–75 кГц свидетельствует о дискомфортном состоянии животных или их астенизации (появление при утомлении, постстрессовых состояниях). Для УЗВ высокочастотного диапазона (75 и более кГц) интерпретируемых признаков на этом этапе работы не выявлено.

Применение фармакологических средств и нейротоксикантов позволяет изменить функциональное состояние животных, что также может проявиться в картине их УЗВ [4, 9, 15, 20, 27], при этом для выявления некоторых специфических видов психо-фармакологической активности необходимо предварительно смоделировать измененное

состояние у животных (эмоциональный стресс, депрессию, утомление и т.д.).

В настоящее время весьма перспективной выглядит привлечение методики УЗВ для поиска средств лечения расстройств аутического спектра и моделирования этого патологического состояния [3], доклинической оценки различных биологически активных веществ природного происхождения [2, 5].

Как отмечалось выше, в качестве дополнительной шкалы в интерпретации результатов оценки УЗВ также должна учитываться интенсивность вокализации. Проведенные исследования показали, что в состоянии спокойного бодрствования в комфортных для животного условиях интенсивность вокализации находится в диапазоне 75–150 эпизодов/час. Более интенсивная вокализация (150–400 эпизодов/час) была характерна для животных, находящихся в состоянии напряжения, возбуждения, дискомфорта, а более низкая (ниже 75 эпизодов/час) свидетельствует о гипоактивном состоянии, заторможенности, угнетении нервной системы.

Опираясь на полученные в процессе работы в данном направлении результаты, а также на имеющиеся литературные сведения по преобладанию «комфортного» или «дискомфортного» диапазона, нами предложена диагностическая матрица УЗВ-сигналов (рис. 2), позволяющая на основании частотных диапазонов доминирующих спектральных пиков идентифицировать психоэмоциональное состояние животных, а в исследованиях с моделированием эмоционально-значимых состояний и исследованиях психофармакологических средств — также соответствующий эффект изучаемых соединений.

Заключение

Проведенный анализ литературы и собственных экспериментальных данных по ультразвуковой вокализации животных

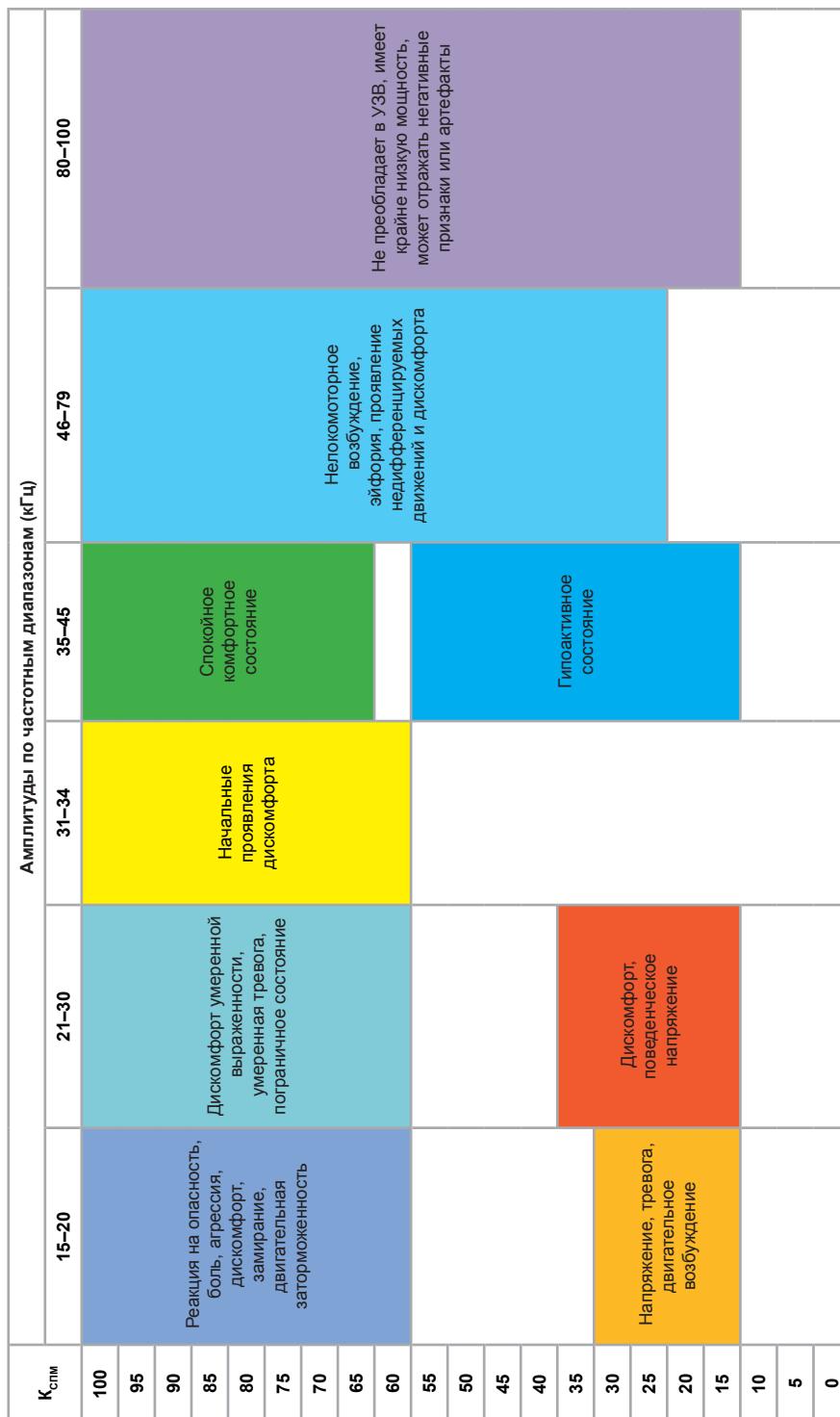


Рис. 2. Диагностическая матрица интерпретации УЗВ-сигналов.

Примечание: амплитуды СПМ менее 10 ед. никак не считаются и к диагностической матрице не применимы.

Fig. 2. Diagnostic matrix for interpreting of USV signs.

Note: PSD amplitudes less than 10 units are not considered as peaks and are not applicable to the diagnostic matrix.

подтвердил возможность идентификации эмоциональных состояний лабораторных животных по результатам частотного анализа ультразвуковой вокализации. Оптимальными объектами исследования в экспериментах с оценкой УЗВ являются лабораторные крысы. Применение для интерпретации полученных результатов УЗВ-исследований разработанной диагностической матрицы позволяет идентифицировать такие нейрофизиологические феномены, как стресс, тревога и напряжение, реакция на экстремальные по интенсивности воздействия, дискомфортные и комфортные эмоциональные состояния, утомление, за-

торможенность и угнетение, постстрессорные состояния. Изменения в картине УЗВ под влиянием фармакологических средств позволяют на скрининговом уровне выявить признаки анксиолитического, седативного, антиастенического и активирующего действия биологически активных веществ, что делает методику исследования УЗВ ценным инструментом доклинического исследования медицинских технологий и нейротропных лекарственных средств. Методика исследования феномена ультразвуковой вокализации у крыс может широко использоваться при моделировании различных заболеваний и пограничных состояний ЦНС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

1. Гаврилов В.В. Кооперация и ультразвуковая коммуникация у крыс. *Когнитивные исследования*. Вып. 7. Под ред. Д.В. Ушакова, А.А. Медынцева. М.: ИП РАН, 2017:81–91. [Gavrilov V.V. Kooperaciya i ul'trazvukovaya kommunikaciya u krys [Cooperation and ultrasonic communication in rats]. *Kognitivnye issledovaniya* [Cognitive studies]. Iss. 7. Ed. by D.V. Ushakov, A.A. Medyntsev. Moscow: IP RAN Publ. 2017:81–91. (In Russian)].
2. Гасанов М.Т., Фокин Ю.В., Люблинский С.Л., Алимкина О.В., Табоякова Л.А., Каркищенко В.Н. Доклинические исследования эффективности и безопасности комплекса биологически активных веществ, выделенных из мускуса кабарги сибирской, в липосомированной лекарственной форме. *Биомедицина*. 2022;18(4):48–62. [Gasanov M.T., Fokin Yu.V., Lyublinskiy S.L., Alimkina O.V., Taboyakova L.A., Karkischenko V.N. Doklinicheskie issledovaniya effektivnosti i bezopasnosti kompleksa biologicheski aktivnyh veshchestv, vydelennyh iz muskusa kabargi sibirskoj, v liposomirovannoj lekarstvennoj forme [Preclinical studies of the efficacy and safety of a complex of biologically active substances isolated from Siberian musk deer musk in liposomal dosage form]. *Biomedicina* [Journal Biomed]. 2022;18(4):48–62. (In Russian)].
3. Громова Д.С., Павлова О.Н., Мякишева Ю.В., Попова Н.Р. Обзор подходов к моделированию расстройств аутистического спектра у животных и изучение эффективности моделей в биомедицинских исследованиях (обзор проблемы). *Лабораторные животные для научных исследований*. 2024;4:14–21. [Gromova D.S., Pavlova O.N., Myakisheva Yu.V., Popova N.R. Obzor podkhodov k modelirovaniyu rasstrojstv autisticheskogo spektra u zhivotnyh i izuchenie effektivnosti modelej v biomedicinskih issledovaniyah (obzor problemy) [Review of approaches to modeling autism spectrum disorders in animals and studying the effectiveness of models in biomedical research (review of the problem)]. *Laboratornye zhivotnye dlya nauchnyh issledovanij* [Laboratory animals for scientific research]. 2024;4:14–21. (In Russian)].
4. Запекин С.Г., Шапошников К.В., Суслов Н.И., Кульпин П.В., Фёдорова Ю.С. Преимущества методики регистрации ультразвуковых вокализаций при исследовании анксиолитической активности фармакологических субстанций. *Актуальные вопросы фундаментальной и клинической медицины*. Сб. мат-лов конгресса молодых ученых. Томск, 2020:485–489. [Zapekin S.G., Shaposhnikov K.V., Suslov N.I., Kulpin P.V., Fedorova Yu.S. Preimushchestva metodiki registracii ul'trazvukovyh vokalizacij pri issledovanii anksioliticheskoy aktivnosti farmakologicheskikh substancij [Advantages of the method of recording ultrasonic vocalizations in the study of the anxiolytic activity of pharmacological substances]. *Aktual'nye voprosy fundamental'noj i klinicheskoj mediciny* [Current issues in fundamental and clinical medicine]. Sb. mat-lov kongressa molo-dyh uchenyh [Collection of materials of the congress of young scientists]. Tomsk, 2020:485–489. (In Russian)].
5. Каркищенко В.Н., Фокин Ю.В., Чайванов Д.Б., Чудина Ю.А., Николаев А.А. Влияние транскраниальной низкочастотной электростимуляции головного мозга на спектральные характеристики ультразвуковой вокализации мини-свиней светлогорской популяции. *Биомедицина*. 2015;3:20–26. [Karkischenko V.N., Fokin Yu.V., Chayvanov D.B., Chudina Yu.A., Nikolaev A.A. Vliyanie transkranial'noj nizkochastotnoj elektrostimulyacii golovnogo

- mozga na spektral'nye harakteristiki ul'trazvukovoj vokalizacii mini-svinej svetlogorskoy populyacii [The influence of transcranial low-frequency electrical stimulation of the brain on the spectral characteristics of ultrasonic vocalization of minipigs of the Svetlogorsk population]. *Biomedicina [Journal Biomed]*. 2015;3:20–26. (In Russian).
6. Каркищенко В.Н., Фокин Ю.В., Шустов Е.Б. Анализ поведенческих характеристик и ультразвуковой вокализации лабораторных крыс при фармакологической коррекции их психоэмоционального состояния. *Биомедицина*. 2015;3:33–42. [Karkischenko V.N., Fokin Yu.V., Shustov E.B. Analiz povedencheskih harakteristik i ul'trazvukovoj vokalizacii laboratornyh krys pri farmakologicheskoy korrekciy ix psihoemocional'nogo sostoyaniya [Analysis of behavioral characteristics and ultrasonic vocalization of laboratory rats during pharmacological correction of their psychoemotional state]. *Biomedicina [Journal Biomed]*. 2015;3:33–42. (In Russian)].
7. Каркищенко Н.Н. *Основы биомоделирования*. М.: Изд-во ВПК, 2004:607. [Karkischenko N.N. *Osnovy biomodelirovaniya [Fundamentals of biomodeling]*. Moscow: Izd-vo VPK, 2004:607. (In Russian)].
8. Каркищенко Н.Н. *Психоунитропизм лекарственных средств*. М.: Медицина, 1993:208. [Karkischenko N.N. *Psichounitropizm lekarstvennyh sredstv [Psychounitropism of drugs]*. Moscow: Medicina Publ., 1993:208. (In Russian)].
9. Каркищенко Н.Н., Фокин Ю.В., Каркищенко В.Н., Сахаров Д.С., Алимкина О.В. Роль нейромедиаторных систем мозга в генерации ультразвуковой вокализации и ее корреляции с поведением животных. *Биомедицина*. 2011;4:8–18. [Karkischenko N.N., Fokin Yu.V., Karkischenko V.N., Sakharov D.S., Alimkina O.V. Rol' nejromediatornyh sistem mozga v generacii ul'trazvukovoj vokalizacii i ee korrelyacii s povedeniem zhivotnyh [The role of neurotransmitter systems of the brain in the generation of ultrasonic vocalization and its correlation with animal behavior]. *Biomedicina [Journal Biomed]*. 2011;4:8–18. (In Russian)].
10. Каркищенко Н.Н., Фокин Ю.В., Николаев А.А., Чудина Ю.А., Чайванов Д.Б., Емельянова А.Е. Информативные параметры ультразвуковой вокализации кроликов при высокочастотной транскраниальной электростимуляции. *Биомедицина*. 2017;4:46–52. [Karkischenko N.N., Fokin Yu.V., Nikolaev A.A., Chudina Yu.A., Chayvanov D.B., Emelyanova A.E. Informativnye parametry ul'trazvukovoj vokalizacii krolikov pri vysokochastotnoj transkranialnoj elektrostimulacii [Informative parameters of ultrasonic vocalization of rabbits during high-frequency transcranial electrical stimulation]. *Biomedicina [Journal Biomed]*. 2017;4:46–52. (In Russian)].
11. Каркищенко Н.Н., Фокин Ю.В., Сахаров Д.С., Каркищенко В.Н., Капанадзе Г.Д., Чайванов Д.Б. Ультразвуковая вокализация и ее информативные параметры у животных и человека. *Биомедицина*. 2011;1:4–23. [Karkischenko N.N., Fokin Yu.V., Sakharov D.S., Karkischenko V.N., Kapanadze G.D., Chaivanov D.B. Ul'trazvukovaya vokalizaciya i ee informativnye parametry u zhivotnyh i cheloveka [Ultrasonic vocalization and its informative parameters in animals and humans]. *Biomedicina [Journal Biomed]*. 2011;1:4–23. (In Russian)].
12. Каркищенко Н.Н., Чайванов Д.Б., Фокин Ю.В. Рекомендации по устранению шумов при записи параметров ультразвуковой вокализации животных и человека. *Вестник психофизиологии*. 2012;1:45–47. [Karkischenko N.N., Chayvanov D.B., Fokin Yu.V. Rekomendacii po ustraneniyu shumov pri zapisi parametrov ul'trazvukovoj vokalizacii zhivotnyh i cheloveka [Recommendations for eliminating noise when recording ultrasonic vocalization parameters of animals and humans]. *Vestnik psichofiziologii [Bulletin of Psychophysiology]*. 2012;1:45–47. (In Russian)].
13. Лупанова А.С. Сравнительный анализ вокализаций диких и линейных домовых мышей (*Mus musculus*). *Акустический журнал*. 2024;70(S5):54. [Lupanova A.S. Sravnitel'nyj analiz vokalizacij dikih i linejnyh domovyh myshej (*Mus musculus*) [Comparative analysis of vocalizations of wild and linear house mice (*Mus musculus*)]. *Acoustic journal*. 2024;70(S5):54. (In Russian)].
14. Музыко Е.А., Лукина А.С., Карелина Д.А., Тарасов А.С., Перфилова В.Н., Фролов Е.М., Фролов М.Ю. Исследование поведенческих реакций и длительности ультразвуковой вокализации у крысят от стрессированных в период беременности самок. *Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова*. 2025;125(3):117–123. [Muzyko E.A., Lukina A.S., Karelina D.A., Tarasov A.S., Perfilova V.N., Frolov E.M., Frolov M. Yu. Issledovanie povedencheskikh reakcij i dlitel'nosti ul'trazvukovoj vokalizacii u krysyat ot stressirovannyh v period beremennosti samok [Study of behavioral reactions and duration of ultrasonic vocalization in rat pups from females stressed during pregnancy]. *S.S. Korsakov Journal of Neurology and Psychiatry*. 2025;125(3):117–123. (In Russian)].
15. Нестерова Ю.В., Всяких О.В., Кульпин П.В., Поветьева Т.Н., Зюзков Г.Н., Суслов Н.И., Жданов В.В., Лосев Е.А. Сравнительное исследование анксиолитической активности зонгорина в приподнятом крестообразном лабиринте и методом регистрации ультразвуковых вокализаций. *Бюллетень экспериментальной биологии и медицины*. 2024;177(5):612–616. [Nesterova Yu.V., Vsyakikh O.V., Kulpin P.V., Povetyeva T.N., Zuzkov G.N., Suslov N.I., Zhdanov V.V., Losev E.A. Sravnitel'noe issledovanie anksioliticheskoy aktivnosti zongorina v pripodnyatom krestoobraznom labirinte i metodom registracii ul'trazvukovyh vokalizacij [Comparative study of the anxiolytic activity of songorine in the elevated plus maze and by recording ultra-

- sonic vocalizations]. *Bulletin of Experimental Biology and Medicine*. 2024;177(5):612–616. (In Russian)].
16. Пьяченко Г.А., Урыбаев Ю.В., Ноздрин В.И. Совместное применение комплексов LABORAS и SONOTRACK при исследовании поведенческих реакций у крыс. Ученые записки Орловского государственного университета. Сер.: Естественные, технические и медицинские науки. 2013;6:238–242. [Pyavchenko G.A., Urybaev Yu.V., Nozdrin V.I. Sovmestnoe primenenie kompleksov LABORAS i SONOTRACK pri issledovanii povedensheskikh reakcij u krys [Combined use of the LABORAS and SONOTRACK systems in studying behavioral responses in rats]. *Uchenye zapiski Orlowskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Estestvennye, tehnicheskie i medicinskie nauki* [Scientific Notes of Oryol State University. Series: Natural, Technical and Medical Sciences]. 2013;6:238–242. (In Russian)].
17. Рига В.Д., Ребик А.А., Смирнов К.С., Сысоева О.В., Мидзяновская И.С. Ультразвуковая вокализация как маркер нарушений зоосоциального взаимодействия у крыс. Сб. тезисов XXVI научной школы — конференции молодых ученых по физиологии высшей нервной деятельности и нейрофизиологии. М., 2022:257–261. [Riga V.D., Rebik A.A., Smirnov K.S., Sysoeva O.V., Midzyanovskaya I.S. Ul'trazvukovaya vokalizaciya kak marker narushenij zoosocial'nogo vzaimodejstviya u krys [Ultrasonic vocalization as a marker of disturbances in zoosocial interaction in rats]. *Sb. tezisov XXVI nauchnoj shkoly-konferencii molodyh uchenyh po fiziologii vysshej nervnoj deyatel'nosti i neyrofiziologii* [Collection of abstracts of the XXVI scientific school-conference of young scientists on the physiology of higher nervous activity and neurophysiology]. Moscow, 2022:257–261. (In Russian)].
18. Ситникова Е.Ю. Ультразвуковая вокализация лабораторных крыс как новый источник информации для экспериментатора. Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях. Труды VIII Всеросс. конф. Нижний Новгород, 2023:146–147. [Sitnikova E.Yu. Ul'trazvukovaya vokalizaciya laboratornyh krys kak novyj istochnik informacii dlya eksperimentatora [Ultrasonic vocalization of laboratory rats as a new source of information for the experimenter]. *Nelinejnaya dinamika v kognitivnyh issledovaniyah* [Nonlinear dynamics in cognitive research]. Trudy VIII Vseross. konf. [Proceedings of the VIII All-Russian Conf.]. Nizhny Novgorod, 2023:146–147. (In Russian)].
19. Фокин Ю.В. Применение анализа ультразвуковой вокализации лабораторных животных в биомедицинских и доклинических исследованиях: автореф. дисс. ... канд. биол. наук. М.: НИИ нормальной физиологии им. П.К. Анохина РАМН, 2014:28. [Fokin Yu.V. Primenenie analiza ul'trazvukovoj vokalizacii laboratornyh zhivotnyh v biomedicinskikh i doklinicheskikh issledovaniyah [Application of Ultrasonic Vocalization Analysis of Laboratory Animals in Biomedical and Preclinical Research]. Abstract of Dissertation ... Cand. Sci. (Biol.). Moscow: NII normal'noj fiziologii im. P.K. Anohina RAMN Publ., 2014:28. (In Russian)].
20. Фокин Ю.В., Берзина А.Г., Каркищенко В.Н., Алимкина О.В., Гамалея Н.Б. Влияние разных доз этанола на ультразвуковую вокализацию крыс. Биомедицина. 2015;1:45–53. [Fokin Yu.V., Berzina A.G., Karkischenko V.N., Alimkina O.V., Gamaleya N.B. Vliyanie raznyh doz etanol'a na ul'trazvukovuyu vokalizaciyu krys [Effect of different doses of ethanol on ultrasonic vocalization of rats]. *Biomedicina [Journal Biomed]*. 2015;1:45–53. (In Russian)].
21. Фокин Ю.В., Каркищенко В.Н. Вокализация крыс в ультразвуковом диапазоне как модель оценки стрессового влияния обездвиживания, электроожогового раздражения, физической нагрузки и фармакодинамики лекарств. Биомедицина. 2010;5:17–21. [Fokin Yu.V., Karkischenko V.N. Vokalizaciya krys v ul'trazvukovom diapazone kak model' ocenki stressovogo vliyanija obezdvizhivaniya, elektrokozhnogo razdrzheniya, fizicheskoj nagruzki i farmakodinamiki lekarstv [Vocalization of rats in the ultrasonic range as a model for assessing the stressful effect of immobilization, electrocutaneous stimulation, physical activity and pharmacodynamics of drugs]. *Biomedicina [Journal Biomed]*. 2010;5:17–21. (In Russian)].
22. Knutson B., Burgdorf J., Panksepp J. Ultrasonic vocalizations as indices of affective states in rats. *Psychol. Bull.* 2002;128:961–977.
23. Liu Ya., Cotton J.A., Shen B., Han X., Rossiter S.J., Zhang Sh. Convergent sequence evolution between echolocating bats and dolphins. *Current Biology*. 2010;20(2):R53–R54.
24. Panksepp J., Burgdorf J. “Laughing” rats and the evolutionary antecedents of human joy? *Physiology and Behavior*. 2003;79:533–547.
25. Portfors C.V. Types and functions of ultrasonic vocalizations in laboratory rats and mice. *J. Am. Ass. Lab. An. Sci.* 2007;46(1):28–34.
26. Sanchez C. Stress-induced vocalization in adult animals. A valid model of anxiety? *Eur. J. Pharmacol.* 2003;28(463(1–3)):133–143.
27. Wöhr M., Borta A., Schwarting R.K.W. Overt behavior and ultrasonic vocalization in fear conditioning paradigm: A dose-response study in the rat. *Neurobio Learn Mem.* 2005;84:228–240.
28. Zippelius H.M., Schleidt W.M. Ultraschall-Laute bei jungen Mäusen. *Naturwissenschaften*. 1956;43:502.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Каркищенко Николай Николаевич, д.м.н., проф., акад. РАРАН, чл.-корр. РАН, ФГБУН «Научный центр биомедицинских технологий Федерального медико-биологического агентства России»;
e-mail: niknik2808@yandex.ru

Фокин Юрий Владимирович*, к.б.н., ФГБУН «Научный центр биомедицинских технологий ФМБА России»;
e-mail: fokin@scbmt.ru

Шустов Евгений Борисович, д.м.н., проф., ФГБУН «Научный центр биомедицинских технологий Федерального медико-биологического агентства», ФГБУ «Научно-клинический центр токсикологии имени академика С.Н. Голикова» ФМБА России;
e-mail: shustov-msk@mail.ru

Nikolay N. Karkischchenko, Dr. Sci. (Med.), Prof., Academician of the Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Scientific Center of Biomedical Technologies of the Federal Medical and Biological Agency of Russia;
e-mail: niknik2808@yandex.ru

Yuriy V. Fokin*, Cand. Sci. (Biol.), Scientific Center of Biomedical Technologies of the Federal Medical and Biological Agency of Russia;
e-mail: fokin@scbmt.ru

Evgeny B. Shustov, Dr. of Sci. (Med.), Prof., Scientific Center of Biomedical Technologies of the Federal Medical and Biological Agency of Russia, Scientific and Clinical Center of Toxicology named after S.N. Golikov of the Federal Medical and Biological Agency of Russia;
e-mail: shustov-msk@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author