

РАСПОЗНАВАНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ ДЕЛЬФИНАМИ (*TURSIOPS TRUNCATUS*) ШУМОВЫХ СИГНАЛОВ В УСЛОВИЯХ ШУМОВОЙ ПОМЕХИ И ПРОСТРАНСТВЕННОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИХ ОДНОВРЕМЕННОГО ПРЕДЪЯВЛЕНИЯ

© 2024 г. А. В. Ахи^{а,*}

^аФГБУН Институт эволюционной физиологии и биохимии им. И.М. Сеченова РАН,
пр. М. Тореза 44, Санкт-Петербург, 194223 Россия

*e-mail: andrey.akhi@gmail.com

Поступила в редакцию 23.03.2023 г.

После доработки 24.11.2023 г.

Принята к публикации 24.04.2024 г.

Исследована возможность слуховой системы дельфинов распознавать и классифицировать по определенным инвариантным признакам шумовые сигналы под воздействием шумовых помех и в условиях пространственной неопределенности одновременного предъявления положительных и отрицательных сигналов. Дельфины-афалины, обученные дифференцировать подобные сигналы, должны были решать эту задачу в условиях, имитирующих реальные морские, когда восприятие полезного шумового сигнала происходит на фоне похожих сигналов и на фоне шумовых помех. Сначала шумовые сигналы последовательно предъявлялись животному на фоне белого маскирующего шума. В дальнейшем дельфин должен был идентифицировать сигнал положительного класса из нескольких одновременно звучащих источников звука. Эффективность работы животного оценивалась при нескольких заданных уровнях шумовой помехи. При этом фактической шумовой помехой являлся как белый шум, так и одновременно звучащие отрицательные сигналы. Показано, что эффективность и помехоустойчивость слуховой системы дельфина зависит от степени альтернативности пространственной неопределенности одновременного предъявления сигналов.

Ключевые слова: дельфин, шумовые сигналы, шумовые помехи, классификация сигналов дельфинами, пространственная неопределенность

DOI: 10.31857/S0320791924030144 EDN: ZKNZNJ

ВВЕДЕНИЕ

Принципы и механизмы анализа акустических сигналов слуховой системой эхолоцирующих морских животных, показывающие как она работает, представляют чрезвычайно важный вопрос. Акустическое восприятие окружающей среды играет исключительно важную роль в жизнедеятельности морских млекопитающих, таких как дельфины-афалины. С помощью органа слуха происходит локализация направления и различение свойств источника звука. Это происходит как в пассивном режиме акустического восприятия, так и в активном режиме, когда объекты зондируются локационными сигналами животного и отражают эхосигналы, несущие об объектах информацию. Работа сонара дельфинов в активном режиме при восприятии широкополосных ультразвуковых сигналов достаточно изучена в большом количестве

экспериментальных работ [1–4]. При работе сонара в активном режиме известно направление прихода эхосигнала и расстояние до источника отражения, определяемое временем прихода эха и его интенсивностью. Частотный диапазон эхосигнала, как правило, совпадает с частотами локационного сигнала. Информация об объекте локации содержится в тонкой спектрально-временной структуре полученных от него эхосигналов. При работе в пассивном слуховом режиме перед животным стоит более сложная задача анализа акустической информации, когда заранее неизвестны направление и момент прихода звука, а также его свойства (спектрально-временные характеристики). Эффективное восприятие низкочастотного сигнала, пришедшего с заранее неизвестного направления, требует, чтобы пассивный слух был ненаправленным. Это подтверждают исследования направленности восприятия дельфинов в

области низких частот [1–3, 5]. Такая ненаправленность приема сочетается с возможностью дельфинов отстраиваться от пространственно удаленных помех. Низкочастотность слуха обеспечивает дельфинам возможность обнаружения и распознавания источников полезных сигналов на больших расстояниях, благодаря малому затуханию звука в воде на низких частотах, и она важна потому, что важнейшими биогенными звуками для них являются низкочастотные звуки рыб. В пассивном режиме орган слуха работает по методу, известному в гидролокации как пеленгование. Обнаружение источников сигналов, определение направления на него и его распознавание происходят путем исследования пространственной структуры звукового поля, создаваемого объектами поиска. Современные знания об основных механизмах слуха дельфинов, лежащие в основе их высокоразвитой эхолокационной системы, еще далеко не полны. В частности, остаются во многом неясными механизмы, определяющие высокую помехоустойчивость сонара, превосходящую по многим параметрам аналогичные свойства технических акустических систем.

Дельфину в морской среде непрерывно приходится сталкиваться с необходимостью восприятия полезного сигнала в присутствии акустических помех биогенного, абиогенного и антропогенного происхождения, а также помех, связанных с эхолокационными сигналами от препятствий, не являющихся в данный момент объектами локации. Многочисленные источники посторонних звуков снижают надежность функционирования сонара. Дельфину приходится решать задачу по обеспечению помехоустойчивости акустического канала связи. В процессе эволюционного развития и экологической специализации слух дельфина приспособился к функционированию в условиях постоянного воздействия различного рода акустических помех и извлекает нужную информацию из комплекса различных звуков.

Наблюдения за дельфинами в естественной среде обитания и экспериментальные исследования свидетельствуют о высокой эффективности работы эхолокатора этих животных при обнаружении препятствий и распознавании целей в зашумленной среде. В последние годы исследователи изучали влияние шума на работу слуховой системы дельфинов [6–8] или изменение поведения животных при действии акустического шума [9].

При изучении влияния искусственно создаваемого шума на функционирование сонара дельфина было показано [2, 10, 11], что животное не теряет способности обнаруживать и различать предметы (сферические мишени различались по материалу и размеру), если звуковое давление белого шума достигает 900 Н/м^2 в полосе частот 1–150 кГц. Способность дельфина обнаруживать рыбу наблюдается при таких уровнях шума, при которых не представляется возможным выделить из шума полезный сигнал обычными гидроакустическими средствами. Это можно истолковать в пользу наличия у дельфинов механизмов, эффективно снижающих воздействие на сонар окружающего шума. Среди возможных адаптивных механизмов, позволяющих дельфину снижать маскирующее влияние помех, в литературе указывается на увеличение уровня зондирующих сигналов [2, 3, 9], изменение дискретных частот спектральных характеристик импульсов [2, 3, 11], изменение частоты их следования [2], механизмы временной селекции эхосигналов [2, 3], целесообразное изменение поведения [2], наличие острой пространственной направленности излучения [2].

Во многих экспериментальных работах, посвященных изучению устойчивости слуховой системы дельфина к воздействию помех, в качестве полезного сигнала использовались тональные сигналы широкого диапазона частот и импульсы различной длительности. Достаточно хорошо изучено восприятие ими полезного тонального и шумового сигнала из шумовой помехи и влияние шума на эхолокационный процесс обнаружения и распознавания целей [1–3]. Шум при этом являлся элементом методических приемов, позволяющих оценить функциональные возможности слуха дельфинов. В естественной среде обитания животного полезный сигнал всегда либо зашумлен, либо сам является шумовым. Существующие в океане шумы являются не только помехой для гидроакустического приема. Часто принимаемый шум является полезным сигналом, несущим полезную информацию о гидрологических, метеорологических, биологических и других важных составляющих акустического поля акватории. Для морских млекопитающих шумы косяков рыб позволяют обнаружить участки эффективного лова, а сигналы источников опасности позволяют ее заблаговременно избежать.

Существует не так много исследований возможностей слуховой системы дельфинов, посвященных восприятию широкополосных шумовых сигналов, меняющих свои параметры, а также их классификации по определенным инвариантным признакам. Интерес к тому, как происходит их восприятие, связан с тем, что большинство реально существующих звуков в морской среде имеют широкополосный шумовой характер, и с тем, что эти сигналы имеют в своих спектрах много информационных признаков, которые могли бы быть использованы дельфином при их распознавании и идентификации. Изучение того, как и какие признаки используются при идентификации сигналов, позволило бы лучше понять механизм работы слуховой системы. Впервые выделение слуховой системой дельфина в спектре сигналов информационных признаков, содержащих инвариантность принадлежности к определенному классу, было показано Н.А. Дубровским с соавторами [12]. Ими же была представлена иерархически организованная система независимых спектральных признаков, которые могут быть использованы как инварианты при классификации сигналов. В порядке значимости это:

1. Макроструктура спектра (форма огибающей);
2. Микроструктура спектра (дискретные составляющие);
3. Энергия сигнала.

В наших работах [13–17] была показана возможность и эффективность идентификации и классификации дельфинами низкочастотных шумоподобных сигналов, а также возможные информационные признаки в спектре сигналов, необходимые и достаточные для их различения. Тем не менее, некоторые вопросы восприятия дельфинами шумовых сигналов остались не изученными.

Задачей настоящей работы является выяснение функциональных возможностей слуховой системы афалины при восприятии, различении и классификации шума как полезного сигнала, в условиях воздействия шумовой помехи и в условиях пространственной неопределенности прихода сигнала при их одновременном предъявлении с разной степенью альтернативности, т.е. в условиях, подобных естественным.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Сигналы, используемые в данном исследовании, представляли собой имитации шумов или шумоподобные сигналы, применявшиеся нами в

предыдущих работах [13–17] (рис. 1). Имитация шумов производилась методом образования широкополосных сигналов, представляющих собой псевдослучайные последовательности прямоугольных импульсов разной полярности, заполненных несущей частотой 125 кГц. Такие последовательности отличаются от случайных тем, что изменение выходного напряжения происходит с частотой, кратной частоте тактовых импульсов, и последовательность имеет период. Такие смоделированные псевдослучайные непрерывные последовательности импульсов создают в результате шумоподобный процесс. Если его временная картина представляет собой различные последовательности прямоугольных импульсов, то спектр сигнала представляет собой набор дискретных составляющих (микроструктура спектра) и характерную для этого набора форму огибающей (макроструктура спектра). И набор дискретных составляющих, и форма их огибающей периодически повторяются по частотной оси с ростом частоты, каждый раз со все меньшей амплитудой. Поэтому эффективный частотный диапазон сформированных сигналов, который определялся временными параметрами импульсов и межимпульсными интервалами, имел низкочастотный характер и был сосредоточен в полосе 150 Гц — 5 кГц. Временное кодирование последовательностей импульсов позволяло формировать и моделировать многообразие широкополосных шумоподобных сигналов. Для их формирования были выбраны три последовательности импульсов, задающих определенный класс сигналов (1-й класс — 10100000, 2-й класс — 10100110, 3-й класс — 11110000). Последовательности импульсов могли растягиваться или сжиматься, что осуществлялось заданием разной длительности одиночного импульса τ — 92, 260 и 560 мкс. Три сигнала одной частотно-временной структуры, но разного частотно-временного масштаба представляли один класс сигналов, а две другие структуры разных масштабов — два других класса сигналов. Для одного из дельфинов, участвующих в опытах, положительным был 1-й класс, для другого дельфина — 3-й.

Эксперименты проводились в свайно-сетевом вольере 7×9×6 м, расположенном в морской бухте. В исследовании принимали участие две взрослые афалины, ранее принимавшие участие в акустических исследованиях по различению шумовых сигналов, по методике поведенческих реакций с пищевым подкреплением при свободном плавании животных. На предъявленный экспериментатором положительный сигнал дельфин должен

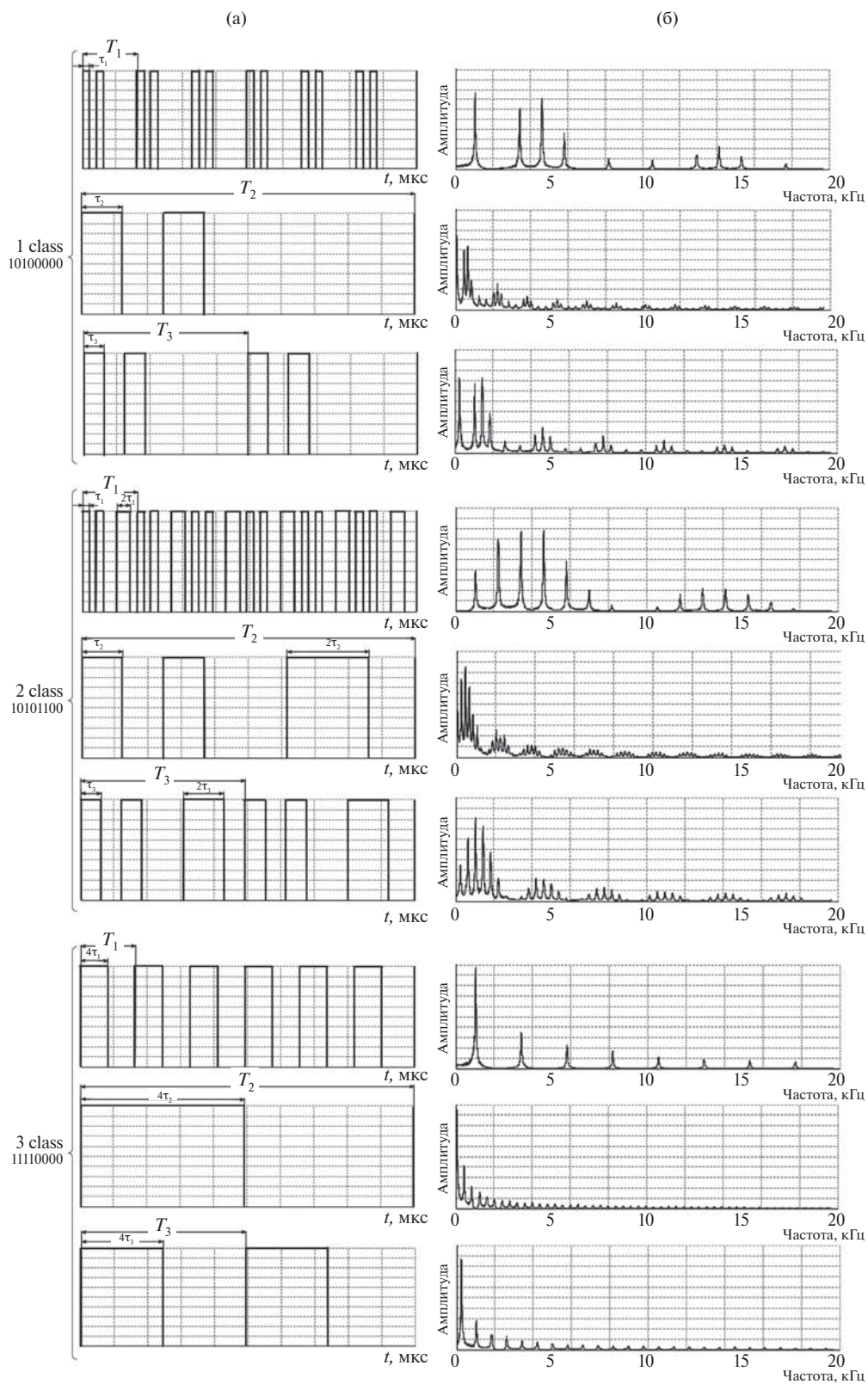


Рис. 1. Временная и спектральная структуры сигналов. (а) — Временная структура сигналов. T — период следования группы импульсов в последовательности. $T_1 = 736$ мкс, $T_2 = 4480$ мкс, $T_3 = 2080$ мкс. τ — минимальная длительность одного импульса в каждом режиме работы: $\tau_1 = 92$ мкс, $\tau_2 = 560$ мкс, $\tau_3 = 260$ мкс ($T = 8\tau$). (б) — Спектральная структура сигналов. По оси абсцисс — частота, по оси ординат — амплитуда спектральных составляющих.

был подойти к пластмассовому манипулятору, находящемуся перед излучающим полезный шумовой сигнал гидрофоном (пьезокерамическая сфера диаметром 20 мм) и коснуться его, за что он получал рыбу. Подход животного на отрицательный сигнал не подкреплялся. На первом этапе перед дельфином ставилась задача отличить положительный класс сигналов с длительностью минимального одиночного импульса 92 мкс от сигнала отрицательного класса с импульсами той же длительности, но другой их последовательности. Сигналы положительного и двух отрицательных классов в случайном порядке последовательно излучались с одного гидрофона, находящегося в 6 м от животного. Далее вводились сигналы других длительностей одиночных импульсов 260 и 560 мкс, т.е. те же сигналы в разных частотно-временных масштабах. Экспериментальная программа обучения состояла из 20 сигналов положительного и по 20 сигналов каждого из отрицательных классов. По результатам первоначального обучения дельфины успешно классифицировали предъявляемые им сигналы с вероятностью $P = 0.95-1.00$.

В естественной среде обитания дельфин чаще встречается с необходимостью выделения и опознавания полезного сигнала, каковым в наших экспериментах являлся положительный шумовой сигнал, на фоне помех разнообразного происхождения. Поэтому на следующем этапе работы определялась способность слуха дельфина идентифицировать класс полезных шумовых сигналов на фоне шумовой помехи. Для зашумления полезного сигнала в 20 см за сигнальным гидрофоном был расположен гидрофон (пьезокерамическая сфера диаметром 30 мм), излучающий белый шум в полосе до 50 кГц. Для оценки отношения сигнал/шум измерялись уровни звукового давления полезного сигнала и звукового давления шумовой помехи в точке стартовой позиции животного. Для оценки порогового отношения сигнал/шум, при котором возможно эффективное распознавание сигнала, были выбраны несколько градаций уровня помехи.

Условия эксперимента следующего этапа были еще более приближены к естественным. Чаще всего у животного возникает необходимость выделения полезного сигнала на фоне одновременного присутствия разных сигналов, в том числе похожего происхождения, но являющихся в данный момент помехой. Причем, направление на источник полезного сигнала неизвестно или оно может меняться. Поэтому для создания ситуации, подобной естественной, в экспериментальном вольере были размещены второй сигнальный гидрофон,

идентичный первому, и такой же, как в первом случае, гидрофон, излучающий белый шум. Разнесение между первыми и вторыми парами гидрофонов — 3.5 м, угловое разнесение относительно стартовой позиции дельфина $\sim 45^\circ$ (рис. 2а). При такой постановке эксперимента эффективность правильного распознавания животным нужного сигнала зависит еще и от углового разнесения гидрофонов. Чем больше угол разнесения (вплоть до 180°), тем легче для дельфина задача и тем выше результат правильной работы. И чем острее угол, тем сложнее выполнение задачи. Поэтому в экспериментах был взят случай среднего углового разнесения (45°). Таким образом, одновременно и в случайном порядке попеременно с одного из разнесенных в вольере гидрофонов излучался сигнал положительного класса, а с другого один из двух сигналов отрицательных классов. Количество различных сочетаний положительных и отрицательных сигналов трех длительностей, излучаемых с двух гидрофонов, составляет 18. В экспериментальной программе было представлено 20 повторов всех возможных сочетаний. При этом общее количество предъявлений составило 360.

На следующем этапе исследования, после адаптации животных к усложнению задачи и оценки эффективности их работы в условиях альтернативного пространственного выбора на фоне шумовой помехи, пространственная неопределенность была увеличена введением третьей пары сигнального и помехового гидрофонов, расположенных на том же расстоянии и с таким же разнесением относительно предыдущих пар гидрофонов (рис. 2б). Дельфин должен был идентифицировать источник сигналов положительного класса, которые могли подаваться в случайном порядке на любой из трех расположенных в вольере сигнальных гидрофонов при одновременной подаче на другие сигнальные гидрофоны шумов отрицательных классов.

Каждое сочетание одновременно представляемых сигналов включало один сигнал положительного класса и два сигнала отрицательных классов разных частотно-временных режимов. Экспериментальная программа обеспечивала предъявление в случайном порядке всех возможных сочетаний сигналов на три сигнальных гидрофона, каковых было 81. При аналогичном двадцатикратном повторении общее число предъявлений составило 1620.

Для оценки отношения сигнал/шум проводилось измерение уровней звукового давления полезного сигнала и звукового давления шумовой помехи. Последний измерялся как суммарное

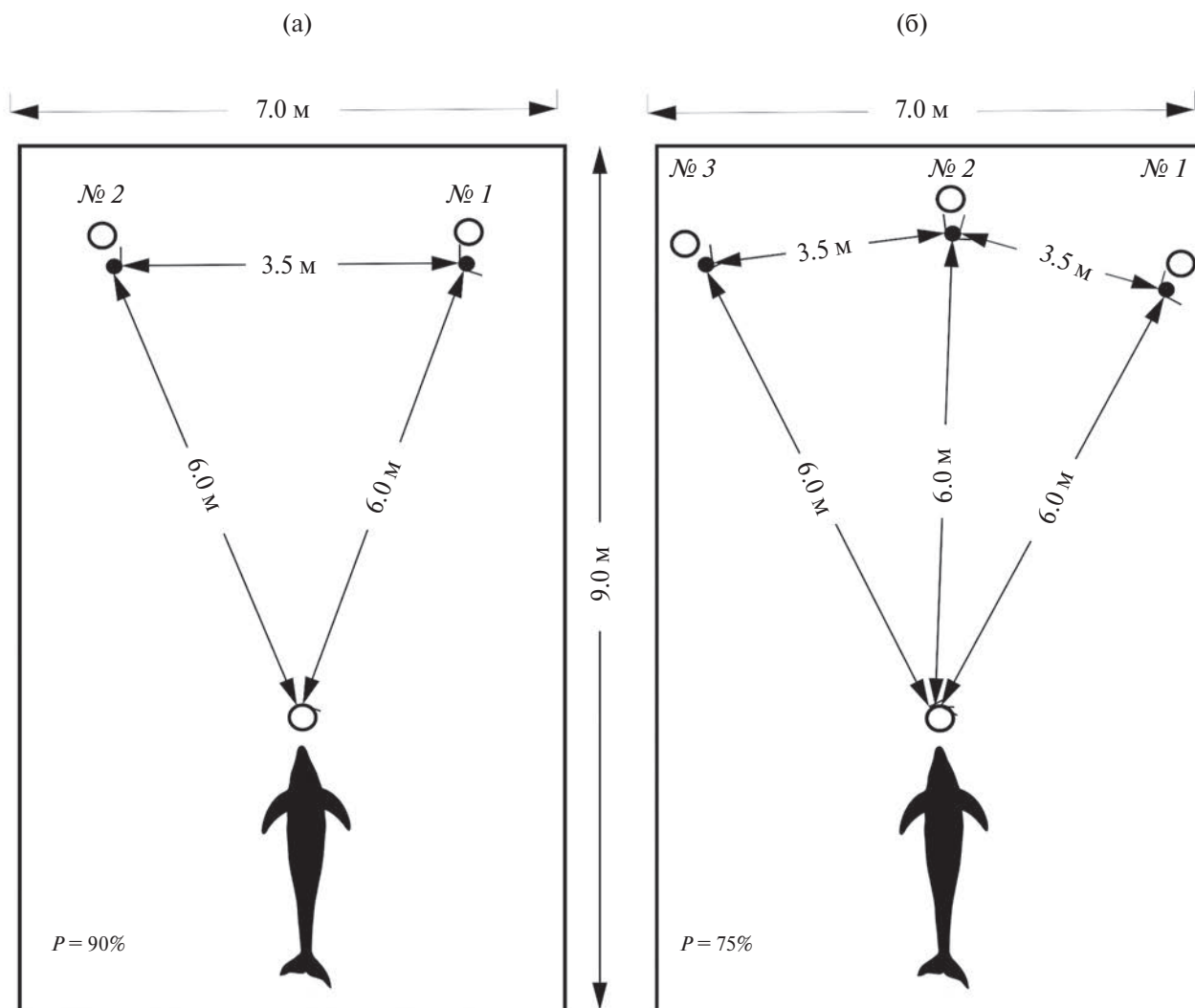


Рис. 2. Схема экспериментов. (а) — Альтернативный (из двух) пространственный выбор сигнала положительного класса. № 1 и № 2 — сигнальные гидрофоны (черные точки) и гидрофоны шумовой помехи (белые кружки). Белый кружок внизу — манипулятор стартовой позиции. (б) — Многоальтернативный (из трех) пространственный выбор сигнала положительного класса. № 1, 2, 3 — гидрофоны аналогично рис. 2а.

звуковое давление, создаваемое тремя гидрофонами, на которые подавался белый шум определенной амплитуды, излучаемый гидрофонами шумовой помехи, и звуковое давление двух сигнальных гидрофонов, на которые подавались сигналы отрицательных классов, воспринимаемых дельфином как помеха. В эксперименте определяли уровень помехи (отношения сигнал/шум), при котором животное выделяет положительный класс сигналов с вероятностью выше 0.7. Опыты проводились по программе, включающей все сочетания предъявляемых сигналов, подаваемые в случайном порядке. На каждый из выбранных уровней шума (суммарный шум шумовой помехи и одновременно звучащих сигналов отрицательных классов)

предъявлялось по 80 сочетаний сигналов. Данные экспериментов статистически обрабатывались. Статистический анализ проводился с помощью пакета обработки данных “SPSS for Windows V. 13”.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты экспериментов по оценке эффективности классификации животными шумовых сигналов в условиях шумовой помехи и различной пространственной неопределенности представлены в таблице.

Статистически значимых различий между эффективностью работы двух животных не обнаружено, поэтому указаны только средние значения.

Таблица. Эффективность классификации дельфинами шумовых сигналов в условиях шумовой помехи и различной пространственной неопределенности

	Последовательный выбор				Выбор из двух				Выбор из трех			
Отношение сигнал/шум	6.7	0.33	0.27	0.17	6.7	0.33	0.27	0.2	2.7	2	1.3	0.7
Эффективность обнаружения, %	97.5	80	75	70	93	75	70	65	80	75	70	40

Доверительный интервал располагается в пределах 1–2%. Как видно, дельфин достаточно уверенно производит идентификацию и классификацию предъявляемых сигналов в случаях последовательного выбора сигналов и не намного хуже в случае альтернативного выбора из двух одновременно звучащих сигналов при интенсивности шумовой помехи, в четыре раза превосходящей интенсивность полезного сигнала. Многоальтернативный выбор источника сигналов из трех одновременно звучащих оказался более сложной задачей. В данном случае достоверная работа животного оказалась возможна, если интенсивность полезного сигнала превышала интенсивность помехи. Поэтому на этом этапе эксперимента были выбраны другие, более адекватные для данного случая отношения сигнал/шум.

Была сделана попытка провести эксперимент при дальнейшем увеличении пространственной альтернативности. Однако, при выборе из четырех одновременно звучащих источников сигналов вероятность правильной работы дельфина даже в отсутствие шумовой помехи оказалась недостаточной (ниже 0.7) [17]. Видимо, для животного это оказалось слишком сложной задачей, поэтому от данного усложнения было решено отказаться.

Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о высокой степени помехозащищенности слуховой системы дельфина при различении и классификации полезных шумовых сигналов. Ранее проведенные исследования [13] показали, что слуховая система дельфина способна различать и классифицировать низкочастотные шумы как полезные сигналы, если в их структуре имеются инвариантные признаки в виде определенной ритмической последовательности импульсов. Способность эта сохраняется и при изменении частотно-временного масштаба внутри класса, при его растяжении сжатии. В настоящем исследовании показано, что слуховая система дельфина сохраняет высокую вероятность обнаружения и классификации этих сигналов в условиях

альтернативного выбора и пространственной неопределенности появления полезного сигнала при наличии шумовых помех, т.е. в условиях максимально приближенных к естественным. Полученные в этих условиях энергетические характеристики эффективности обнаружения дельфином полезного шумового сигнала на фоне помех различных уровней интенсивности свидетельствуют о высокой степени помехозащищенности слуховой системы животного при выделении полезного шумового сигнала из шума, которая сохраняется в сложных условиях альтернативного выбора и пространственной неопределенности появления сигнала. Способность же к пространственной локализации прихода сигнала у дельфинов также высоко развита и имеет чрезвычайно высокую точность как для активного, так и для пассивного слуха животных [18].

Сравнение полученных нами данных о помехоустойчивости слуховой системы дельфинов с помехоустойчивостью слуха других животных, а также с помехоустойчивостью гидроакустических систем свидетельствуют о существенном преимуществе сонара дельфина выделять полезный шумовой сигнал из шумовой же помехи. Дельфин способен выполнять поставленную задачу по идентификации шумового сигнала при наличии помехи, превосходящей сигнал в пять раз. По этому параметру слуховые системы как человека, так и многих животных уступают слуховой системе дельфина. Энергетические характеристики соотношения сигнал/помеха, обеспечивающие надежное выделение полезного сигнала, у человека составляют 1/1 [19], а у летучих мышей, которые, также как и дельфины, являются эхолоцирующими животными, 3/2 [20]. И, хотя абсолютно идентичных экспериментальных исследований по помехоустойчивости слуха дельфинов, летучих мышей и человека не проводилось из за их различного частотного слухового диапазона, среды обитания и других условий, порядок отношений сигнал/помеха говорит о лучшей помехоустойчивости слуховой системы дельфинов.

Технические гидроакустические системы также уступают сонару дельфина по помехоустойчивости. Простые малогабаритные гидроакустические системы могут работать при превышении сигнала над помехой в 2–4 раза. Сложные компьютеризированные и габаритные системы, обеспечивающие накопление и обработку полезного сигнала, могут работать при превосходящем уровне помехи, но даже в этом случае выполнение задачи в условиях многоальтернативной пространственной неопределенности становится проблематичным. Провести корректное количественное сравнение возможностей технической и живой системы еще более проблематично, но в рамках обсуждения возможно лишь упомянуть о качественном превосходстве живого сонара над техническим.

Каковы возможные физиологические механизмы, обеспечивающие эффективное выделение полезного сигнала на фоне шума? В любой приемной акустической системе это может осуществляться снижением интенсивности помехи в процессе прохождения сигнала в приемном тракте путем оптимальной обработки всей информации (полезного сигнала и помехи). Подавление проникновения помехи в живых системах возможно за счет механизмов пространственной избирательности слухового приема. В основе формирования пространственных характеристик слухового приема несомненно лежат физиологические механизмы бинаурального слуха, обеспечивающие направленное избирательное восприятие акустической информации из окружающего пространства, и особенности ориентационного поведения вида [19]. Для лоцирующих животных направленное восприятие сигналов приобретает особо важное значение, т.к. именно эти животные постоянно сталкиваются с необходимостью отличить полезный сигнал от постороннего мешающего шума по небольшой угловой разнице прихода звука. Способность слуховой системы отстраиваться от помех при обнаружении полезного сигнала в условиях шума зависит от степени пространственного разнесения источников сигнала и шума, и свойственна ряду видов животных, в том числе дельфину и человеку, а также летучим мышам [19–21]. В исследованиях на человеке, проведенных по методике пространственного смещения сигнала, было показано, что пространственное разделение источников сигнала и помехи приводит к падению маскирующего влияния помехи на величину до 10 дБ [22, 23]. У дельфина разнесение источников сигнала и шума в горизонтальной плоскости приводит к уменьшению маскирующего влияния

шума на величину 30 дБ [11, 22]. Такое же падение величины маскировки получено для летучих мышей [24]. При пространственном разнесении источников полезного сигнала и помехи за счет интерауральных различий в сигнале происходит уменьшение маскирующего влияния, и сигнал слышится лучше. В случае пространственного совмещения источников сигнала и помехи не существует интерауральных различий в параметрах сигналов на входе системы, и величина маскировки оказывается наибольшей. В этом случае в силу могут вступать иные механизмы, облегчающие выделение полезного сигнала из помехи. Одним из них может быть предварительная настройка слуховой системы при приеме соответствующих сигналов. Настройка системы на прием первоначально предъявляемых сигналов сходна с сенсорной доминантой и объясняется следовыми процессами в слуховых центрах (следовым возбуждением в нейронных сетях), избирательно возбужденных сигналом, и следовым торможением в конкурирующих нейронных группах, избирательно реагирующих на маскирующий шум. Вследствие активной настройки слуха на воспринимаемый полезный сигнал возможно постепенное увеличение ответа слуховых рецепторов [25]. Другим механизмом может быть оптимизация частоты заполнения сигнала (выбор из сигнала оптимальных для восприятия частот). Значение частоты сигнала для помехоустойчивости системы объясняется частотной характеристикой ее входа и особенностями ее нейронных сетей, которые обеспечивают предпочтение частот определенного диапазона.

Оптимальная обработка всей информации (сигнала и помехи), поступающей в приемный тракт, основана на использовании сложных сигналов. Лучшая разрешающая способность достигается при сигналах малой длительности. Как показали результаты настоящей работы, одним из механизмов повышения помехоустойчивости приемной системы дельфинов может быть селекция по длительности импульса. Использование его позволяет животному решить задачу выделения импульсного сигнала, длительность которого лежит в заданных пределах. В наших экспериментах искусственно заданное различие между сигналом и помехой создано с помощью временного кодирования последовательности импульсов, создающее у сигнала свой ритм и спектр с присущим только ему спектральным набором дискретных составляющих. Предварительное обучение животного обеспечило прием и восприятие его слуховой

системой, как положительных (за которые следует вознаграждение), только сигналов, имеющих заданные частотно-временные параметры. В отрицательных сигналах, являющихся помехой, частотно-временные параметры другие. В белом шуме — тем более, там шум распределен равномерно по частоте и во времени. Исходя из аналогии с гидроакустическими системами, выделяющими подобные сигналы из помех, можно предположить, что слуховая система дельфина при различении полезного сигнала из массива положительного и отрицательных сигналов и шумовой помехи работает как приемник взаимно корреляционного типа, согласованного и оптимального фильтра, на выходе которого сигнал представляет собой функцию взаимной корреляции между полезным сигналом и всей поступающей на его вход информацией. Возможно, это достигается путем построения импульсной характеристики фильтра в виде зеркального отображения полезного сигнала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показано, что слуховая система дельфина сохраняет высокую вероятность распознавания и классификации шумоподобных сигналов в условиях альтернативного выбора и пространственной неопределенности их появления при наличии шумовых помех, т.е. в условиях, максимально приближенных к естественным. Физиологические механизмы, используемые дельфинами для выделения полезного сигнала из помехи, представляют непосредственный интерес не только для биологов, но и для инженеров и специалистов в области теории обнаружения сигналов. Изучение этих механизмов должно способствовать более глубокому пониманию адаптационных возможностей специализированных биологических анализаторных систем и способствовать решению важнейших гидроакустических задач.

Все применимые международные, национальные и/или институциональные принципы ухода и использования животных соблюдены в соответствии с принципами Базельской декларации и рекомендациями ARRIVE. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов изучения.

Работа выполнена при поддержке средств федерального бюджета по госзаданию на 2023 г. (№ 075-00967-23-00).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Au W.W.L.* The Sonar of Dolphins. New York: Springer-Verlag, 1993. 227 p.
2. *Белькович В.М., Дубровский Н.А.* Сенсорные основы ориентации китообразных. Л.: Наука, 1976. 203 с.
3. *Дубровский Н.А.* Эхолокационный анализатор черноморской афалины // Черноморская афалина *Tursiops truncatus ponticus*. Морфология. Физиология. Акустика. Гидродинамика. Под ред. Соколова В.Е., Романенко Е.В. М., 1997. 672 с.
4. *Романенко Е.В.* Акустика дельфинов и рыб (обзор) // Акуст. журн. 2019. Т. 65. № 1. С. 82–92.
5. *Попов В.В., Супин А.Я.* Слух китов и дельфинов. КМК Scientific Press, 2013. 220 с.
6. *Попов В.В., Клишин В.О., Нечаев Д.И., Плетенко М.Г., Рожнов В.В., Супин В.Я., Сысуева Е.В., Тараконов М.Б.* Влияние шума на слуховые пороги кита белухи // Докл. Акад. наук. 2011. Т. 440. № 4. С. 332–334.
7. *Попов В.В., Супин А.Я., Рожнов В.В., Сысуева Е.В., Клишин В.О., Нечаев Д.И., Плетенко М.Г., Тараканов М.Г.* Влияние интенсивных шумовых сигналов на слуховую чувствительность белухи (*Delphinapterus leucas*) // Морские млекопитающие Голарктики. 2012. Т. 2. С. 191–195.
8. *Лямин О.И., Корнева С.М., Рожнов В.В., Мухамедов Л.М.* Китообразные и акустический шум; от наблюдений за поведением животных к регистрации физиологических реакций // Морские млекопитающие Голарктики. 2012. Т. 2. С. 41–46.
9. *Southall B.L., Bowies A.E., Ellison W.T., Finneran J.J., Gentry R.Z., Greene C.R., Kasta K.D., Ketten D.R., Miller J.H., Nachtigal P.E., Richardson W.J., Thomas J.A., Tyack P.L.* Marine Mammal Noise Exposure Criteria: Initial Scientific Recommendations // Aquatic Mammals. 2007. V. 33. № 4. P. 1–521.
10. *Бабкин В.П., Дубровский Н.А.* О дальности действия и помехоустойчивости эхолокационного аппарата дельфина-афалины при обнаружении различных мишеней // Тр. Акуст. института. 1971. Вып. 17. С. 29–42.
11. *Абрамов А.П., Голубков А.Г., Королев В.И., Фрадкин В.Б.* О помехозащищенности гидролокатора дельфина // Тр. Акуст. института. 1971. Вып. 17. С. 24–28.
12. *Дубровский Н.А., Зориков Т.В., Квижинадзе О.Ш., Кураташвили М.М.* Признаковое описание сигналов и принципы его организации в слуховой системе афалины // Акуст. журн. 1991. Т. 37. № 5. С. 933–937.

13. Зайцева К.А., Королев В.И., Ахи А.В. Распознавание дельфинами *Tursiops truncatus* классов шумоподобных сигналов // Журн. эвол. биохим. и физиол. 2008. Т. 44. № 2. С. 194–199.
14. Зайцева К.А., Королев В.И., Ахи А.В. Устойчивость пассивного слуха дельфина *Tursiops truncatus* к деформации спектра низкочастотного шума // Журн. эвол. биохим. и физиол. 2012. Т. 48. № 6. С. 573–578.
15. Зайцева К.А., Королев В.И., Ахи А.В. Чувствительность слуха дельфина *Tursiops truncatus* к половой фильтрации спектра низкочастотного шума // Журн. эвол. биохим. и физиол. 2015. Т. 51. № 2. С. 130–136.
16. Зайцева К.А., Королев В.И., Ахи А.В., Бутырский Е.Ю. Восприятие дельфином *Tursiops truncatus* шумов с нестабильной во времени частотной модуляцией их тональных компонент // Журн. эвол. биохим. и физиол. 2017. Т. 53. № 3. С. 215–217.
17. Ахи А.В. Эффективность идентификации дельфинами (*Tursiops truncatus*) классов сложных шумоподобных сигналов в условиях пространственной неопределенности их одновременного предъявления // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2023. Т. 16. № 1. С. 90–97.
18. Рябов В.А. Роль асимметрии левого и правого наружного уха дельфина афалина (*Tursiops truncatus*) в пространственной локализации звука // Акуст. журн. 2023. Т. 69. № 1. С. 101–114.
19. Альтман Я.А. Пространственный слух. СПб.: Институт физиологии им. И.П. Павлова, 2011. 312 с.
20. Grinnell A.D. Mechanisms of overcoming interference in echolocating animals // Animal sonar system. Biology and bionics. 1967. V. 1. Ed. Busnel R.G. JNRA-CNRZ. P. 451–481.
21. Дьяченко С.М., Королев Л.Д., Резвов Р.Н., Чемоданов Б.К. Исследования способности дельфина-афалины определять направление на источник шумового сигнала // Тр. Акуст. института. 1971. Вып. 17. С. 43–46.
22. Зайцева К.А., Акопиан А.И., Морозов В.П. Помехоустойчивость слухового анализатора дельфина как функция угла определения помехи // Биофизика. 1975. Вып. 3. С. 519–521.
23. Мамакин Ю.М. Характеристики бинаурального анализатора слуховой системы человека в свободном звуковом поле // Биофизика. 1974. Т. 19. Вып. 6. С. 1–69–1076.
24. Айрапетьянц Э.Ш., Константинов А.И. Эхолокация в природе. Л.: Наука, 1974. 512 с.
25. Лапшин Д.Н. Функционирование слуховой системы комаров (Diptera Culicidae) в условиях имитации полета // Сенсорные системы. 2014. Т. 28. № 3. С. 52–67.

RECOGNITION AND CLASSIFICATION OF NOISE SIGNALS BY DOLPHINS UNDER CONDITIONS OF NOISE INTERFERENCE AND SPATIAL UNCERTAINTY OF THEIR SIMULTANEOUS PRESENTATION

A. V. Akhi^a

^a*Federal State Budgetary Institution of Science Institute of Evolutionary Physiology and Biochemistry
named after. THEM. Sechenov RAS, M. Torez Ave. 44, St. Petersburg, 194223 Russia*

^{*}*e-mail: andrey.akhi@gmail.com*

The ability of dolphin's auditory system to recognize and classify noise signals according to certain invariant features under the influence of noise interference and spatial uncertainty of their simultaneous presentation was studied. The bottlenose dolphins trained to differentiate such signals had to solve this problem under conditions simulating real marine ones, when the perception of a useful signal occurs against the background of similar signals and noise interference. First, the noise signals were sequentially presented to the animal against the background of white masking noise. Further the dolphin had to identify a signal of a positive class from several simultaneously sounding sound sources. The efficiency of the animal was evaluated at several given levels of noise interference. In this case, the actual noise interference was both white noise and simultaneously sounding negative signals. It's shown that the efficiency and noise immunity of dolphin's auditory system depend on the degree of alternativeness of the spatial uncertainty of the simultaneous presentation of signals.

Keywords: dolphin, noise signals, noise interference, signal classification by dolphins, spatial uncertainty