

УДК 57.084.1

© А. В. Ахи*, 2023

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

*andrey.akhi@gmail.com

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИДЕНТИФИКАЦИИ ДЕЛЬФИНАМИ (*TURSIOPS TRUNCATUS*) КЛАССОВ СЛОЖНЫХ ШУМОПОДОБНЫХ СИГНАЛОВ В УСЛОВИЯХ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИХ ОДНОВРЕМЕННОГО ПРЕДЪЯВЛЕНИЯ

Статья поступила в редакцию 20.10.2022, после доработки 25.01.2023, принята в печать 07.02.2023

Аннотация

В рамках исследования способности слуховой системы дельфинов решать сложную задачу идентификации и классификации по определенным инвариантным признакам шумоподобных сигналов рассмотрена возможность ее решения в условиях пространственной неопределенности их одновременного предъявления. На дельфинах-афалинах, обученных распознавать и классифицировать подобные сигналы, проведено исследование их возможности выбора определенного класса сигналов из нескольких, одновременно звучащих. Дельфин должен был распознать сигнал положительного класса при одновременно звучащей паре сигналов: положительный-отрицательный (альтернативный выбор) и при одновременно звучащих трех сигналах: положительный-отрицательный-отрицательный (многоальтернативный выбор). Показано, что дельфин эффективно решает поставленную задачу при простом альтернативном пространственном выборе из двух источников сигналов, на пределе достоверности при выборе из трех источников и недостоверно при выборе из большего количества источников.

Ключевые слова: дельфин, шумоподобный сигнал, классификация, пространственная неопределенность, альтернативный выбор, многоальтернативный выбор

© А. В. Ахи*, 2023

Sechenov Institute of Evolutionary Physiology and Biochemistry, Russian Academy of Sciences,
194223, Russia, St. Petersburg, M. Thorez pr., 44.

*andrey.akhi@gmail.com

EFFICIENCY OF IDENTIFICATION OF COMPLEX NOISE-LIKE SIGNAL CLASSES BY DOLPHINS (*TURSIOPS TRUNCATUS*) UNDER SIMULTANEOUS PRESENTATION SPATIAL UNCERTAINTY

Received 20.10.2022, Revised 25.01.2023, Accepted 07.02.2023

Abstract

The possibility of dolphin's auditory system to solve the complex problem of identifying and classifying noise-like signals according to certain invariant features is considered under conditions of spatial uncertainty of their simultaneous presentation. There was studied the ability of bottlenose dolphins, which were trained to recognize and classify such signals, to select a certain class of signals from several that sound simultaneously. The dolphin had to recognize a positive class signal with a pair of simultaneously sounding signals: positive-negative (alternative choice) and with simultaneously sounding three signals: positive-negative-negative (multiple choice). It's shown that the dolphin effectively solves the problem with a simple alternative choice of two signal sources, at the limit of reliability when choosing from three sources and unreliable when choosing from more sources.

Keywords: dolphin, noise-like signal, classification, spatial uncertainty, alternative choice, multiple choice

Ссылка для цитирования: 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. doi:10.48612/fpg/vxe3-6531-nkup

For citation: Akhi A.V. Efficiency of Identification of Complex Noise-Like Signal Classes by Dolphins (*Tursiops truncatus*) under Simultaneous Presentation Spatial Uncertainty. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2023, 16, 1, 90–97. doi:10.48612/fpg/vxe3-6531-nkup

1. Введение

Исследование основных принципов и механизмов акустического анализа и выяснение особенностей функционирования слуховой системы морских эхолоцирующих млекопитающих представляет вопрос исключительной важности. Орган слуха у этих животных решает задачу установления свойств источника звука и направления на него как в активном режиме, когда объекты облучаются собственными зондирующими сигналами дельфина и становятся источниками эха, так и в пассивном режиме, когда интересующие животного объекты сами являются источниками звука. В последнем случае орган слуха работает как самостоятельная система анализа акустических сигналов и для эффективного восприятия звуков должен обладать свойством панорамности, т. е. быть постоянно готовым к приему сигналов во всем возможном диапазоне направлений, расстояний, интенсивностей, моментов появления и спектрально-временных характеристик. Условия работы слуха у эхолоцирующих морских млекопитающих в активном и пассивном режимах существенно различаются. Пассивный слух, обеспечивающий восприятие сигналов с заранее неизвестного направления, должен быть ненаправленным. Слуховая система, работающая в пассивном режиме, по существу работает по методу, известному в гидролокации как пеленгование. Обнаружение источников сигналов естественного или искусственного происхождения и определение направления на него достигается путем исследования пространственной структуры звукового поля, создаваемого различными объектами.

В ходе эволюции слуховая система дельфинов приспособилась работать в условиях постоянного действия акустических помех, таких как морские шумы биогенного, абиогенного и антропогенного происхождения. Во многих экспериментальных работах изучена проблема выделения дельфинами полезного сигнала из шумовой помехи [1–4]. Однако существует не так много исследований чувствительности слуховой системы дельфинов к восприятию собственно шумовых сигналов, меняющих свои параметры, а также к их классификации по определенному инвариантному признаку. Их восприятие интересно с одной стороны потому, что большинство реально существующих в морской среде звуков имеет шумовой характер, и, с другой стороны, эти сигналы имеют в своих спектрах много признаков и составляющих, которые могли бы быть использованы дельфином при их распознавании и идентификации. Изучение того, как и какие спектральные информационные признаки используются при распознавании сигналов, позволило бы прийти к пониманию механизма работы слуховой системы. Выделение слуховой системой в спектре сигналов информационных признаков, содержащих инвариантность принадлежности к определенному классу, впервые была рассмотрена Н.А. Дубровским с соавторами [4, 5]. 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 его огибающей); 2) микроструктура спектра (дискретные составляющие) и 3) энергия сигнала. В наших работах [6–9] была показана способность к восприятию и классификации дельфинами низкочастотных шумоподобных сигналов, возможные информационные признаки в спектре сигналов, необходимые и достаточные для их правильной идентификации, а также их иерархическая значимость. Тем не менее, некоторые аспекты восприятия дельфинами подобных сигналов остались неизученными. В настоящей работе исследовалась способность дельфинов различать и классифицировать шумоподобные сигналы в условиях пространственной неопределенности их одновременного предъявления при выборе с разной степенью альтернативности направления их излучения.

2. Материалы и методы

На дельфинах-афалинах, обученных распознавать и классифицировать шумоподобные сигналы, было проведено исследование их возможности выбора определенного класса сигналов из нескольких одновременно звучащих. Сигналы, используемые в данной работе по исследованию способности дельфинов к их пространственному выбору, представляли из себя имитации шумов или шумоподобные сигналы, которые применялись нами в предыдущих работах [6–9] (рис. 1). В основу имитации шумов был положен метод образования широкополосных сигналов, представляющих собой совокупность импульсов разной полярности, находящихся в псевдослучайных последовательностях. В отличие от случайных последовательностей, в них последовательность импульсов имеет период, и выходное напряжение изменяется с частотой, кратной частоте тактовых импульсов (были применены прямоугольные импульсы с заполнением несущей частотой 125 кГц). Созданный для синтеза шумоподобных сигналов генератор позволял моделировать большое многообразие шумоподобных процессов, среди которых были выбраны три последовательности импульсов, задающих определенный класс сигналов (1-й класс — 10100000, 2-й класс — 10100110, 3-й класс — 11110000).

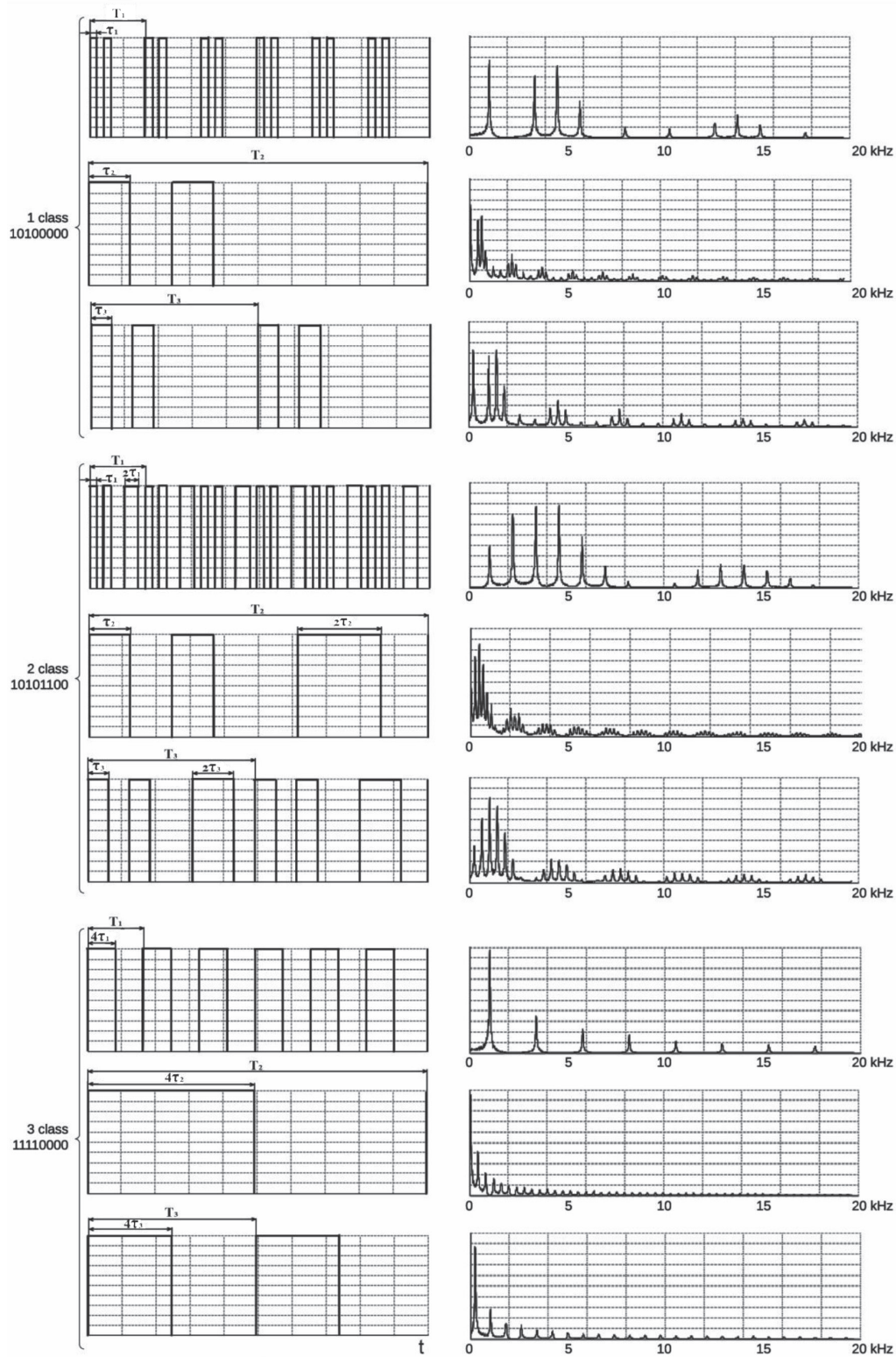


Рис. 1. Временная и спектральная структуры сигналов: *a* — временная структура сигналов. T — период следования группы импульсов в последовательности. $T_1 = 736$ мкс, $T_2 = 4480$ мкс, $T_3 = 2080$ мкс. τ — минимальная длительность одного импульса в каждом режиме работы: $\tau_1 = 92$ мкс, $\tau_2 =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

Fig. 1. Temporal and spectral structures of signals: *a* — temporal structure of signals. T — repetition period of a group of impulses in a sequence. $T_1 = 736$ mcs, $T_2 = 4480$ mcs, $T_3 = 2080$ mcs. τ — minimum duration of one impulse in each operation mode. $\tau_1 = 92$ mcs, $\tau_2 = 560$ mcs, $\tau_3 = 260$ mcs ($T = 8\tau$); *b* — spectral structure of signals. Abscissa — frequency, Y-axis — spectral component amplitude

Внутри каждого класса последовательности могли растягиваться или сжиматься. Это происходило путем задания разной временной длительности одиночного импульса, которая составляла 92, 260 и 560 мкс. Таким образом, три сигнала разного частотно-временного масштаба, но одной частотно-временной структуры представляли один класс сигналов, а две другие структуры с сигналами разного масштаба — два других класса сигналов. Каждый класс сигналов определялся своей формой спектра и одинаковым набором распределения дискретных составляющих. Один класс сигналов был выбран как положительный, два других — как отрицательные. Для двух дельфинов они были разные. Для одного положительным был первый класс, для другого — третий. Эффективный частотный диапазон сигналов был сосредоточен в полосе 150 Гц...5 кГц.

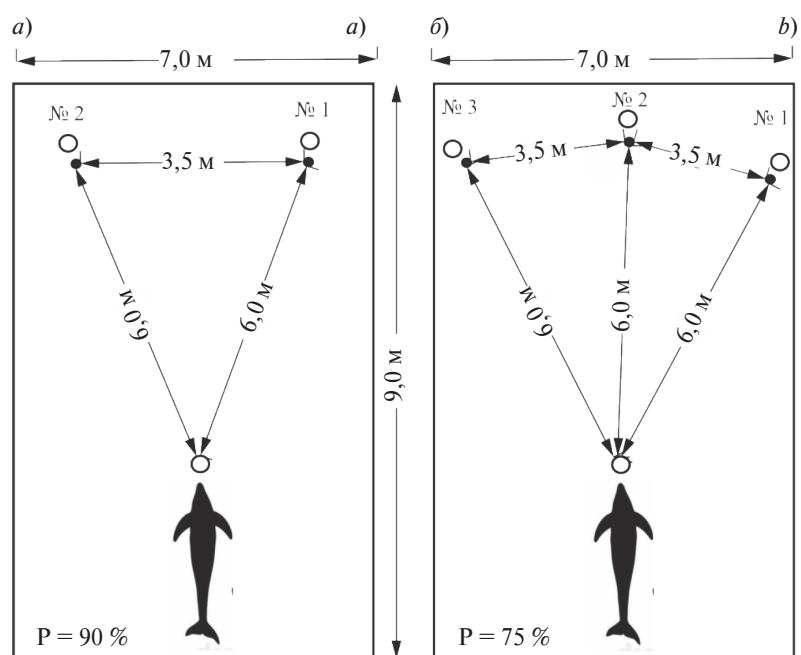
Эксперименты проводились в расположенном в открытой бухте моря свайно-сетевом вольере $9 \times 7 \times 5$ м на двух взрослых дельфинах-афалинах, ранее участвовавших в акустических исследованиях, проведенных по методике поведенческих реакций с пищевым подкреплением при свободном плавании животных. На предъявление положительного сигнала дельфин должен был подойти к расположенному перед гидрофоном индифферентному пенопластовому манипулятору и коснуться его рострумом, за что получал рыбу. Реакция на отрицательный сигнал не подкреплялась. Первоначально перед животным ставилась задача отличить положительный класс сигналов с длительностью импульса 92 мкс от такого же по длительности импульса, но отличающегося по временной последовательности импульсов сигнала отрицательного класса. Сигналы двух классов в случайном порядке последовательно подавались на один излучатель, который размещался в вольере в 6 м от животного. Предъявляемая программа состояла из 20 сигналов положительного и по 20 сигналов каждого из отрицательных классов. Поскольку в каждом классе сигналы были представлены тремя длительностями импульса, всего животному в программе предъявлялось 120 сигналов. Как показали эксперименты, дельфин успешно решал задачу классификации положительного класса шумов в условиях, когда на тот же гидрофон последовательно предъявлялся класс отрицательных сигналов. В результате первоначального обучения дельфины классифицировали предъявляемые им сигналы с высокой вероятностью ($P = 0,95-1,00$).

В естественной среде обитания дельфины редко сталкиваются с такой простой задачей распознавания. Чаще возникает необходимость выделения полезного сигнала на фоне одновременно присутствующих в море множеств похожих сигналов, являющихся в данный момент помехой. Причем, источник нахождения в пространстве полезного сигнала чаще всего неизвестен. Именно поэтому была поставлена задача определить способность слуховой системы дельфина классифицировать шум как полезный сигнал в условиях пространственной неопределенности его прихода при альтернативном выборе. Для этого в акваторию проведения эксперимента был введен второй идентичный гидрофон на расстоянии 3,5 м от первого (рис. 2, а).

Понятно, что эффективность правильной работы животного в таких условиях зависит еще и от углового разнесения источников сигналов. Чем угол больше (вплоть до 180°), тем легче задача и выше результат идентификации. При слишком острых углах задача становится практически невыполнимой. В исследовании был

Рис. 2. Схема экспериментов: а — альтернативный (из двух) пространственный выбор сигнала положительного класса. № 1 и № 2 — гидрофоны, излучающие разные сигналы (черные точки) и манипуляторы, которые должен ударить дельфин при завершении реакции (белые кружки). Белый кружок внизу — манипулятор стартовой позиции; б — многоальтернативный (из трех) пространственный выбор сигнала положительного класса. № 1, № 2, № 3 — гидрофоны и манипуляторы аналогично рис. 2, а

Fig. 2. Experiment scheme: а — positive class signal alternative (of two) spatial choice. № 1 and № 2 — hydrophones emitting different signals (black points) and manipulators that the dolphin must hit when the reaction is completed (white circles). White circle at the bottom — start position manipulator; б — positive class signal multiple (of three) spatial choice. № 1, № 2, № 3 — hydrophones and manipulators similarly Fig. 2, а



взят случай среднего углового разнесения источников $\sim 45^\circ$. Таким образом, одновременно в случайном порядке на один из разнесенных гидрофонов поступал сигнал положительного класса, на другой поступал сигнал одного из двух отрицательных классов. На каждый из гидрофонов в случайном порядке могли подаваться сигналы как положительного, так и отрицательных классов любой из выбранных для эксперимента длительностей импульса. Число различных сочетаний положительных и отрицательных сигналов трех длительностей, подаваемых на два гидрофона, составляет 18. Экспериментальная программа состояла из 20 повторов всех возможных сочетаний. Таким образом, общее количество предъявлений составляло 360.

На втором этапе исследования происходило увеличение пространственной неопределенности появления полезного сигнала, что осуществлялось путем введения в акваторию вольера третьего идентичного гидрофона с таким же пространственным разнесением (рис. 2, б). Задача животного состояла в правильном обнаружении источника сигналов положительного класса, которые могли подаваться в случайном порядке на любой из трех расположенных в вольере гидрофонов. Одновременно на два других подавались шумы отрицательных классов. Таким образом, каждое сочетание одновременно представляемых сигналов включало один сигнал положительного класса и два сигнала отрицательных классов разных длительностей. Рабочая программа обеспечивала предъявление в случайном порядке всех возможных сочетаний, каковых получилось 81, на три гидрофона. Сочетания предъявлялись аналогично с первым этапом двадцать раз, общее число предъявлений — 1620.

2. Результаты и обсуждение

Результаты экспериментов в виде усредненных вероятностей правильного выбора дельфинами предъявленных сигналов даны в таблице 1.

Вероятность распознавания положительного класса шумовых сигналов при простом альтернативном пространственном выборе из двух разнесенных источников сохранялась высокой ($P_{\text{ср}} = 0,9$). Сигналы с длительностью импульса 260 мкс имели наибольшую вероятность различения (91 %). Не выявлено преимуществ распознавания в сочетании сигналов положительного класса с сигналами какого-либо из отрицательных классов. Введение пространственной неопределенности полезного сигнала в виде его появления на одном из двух разнесенных в вольере гидрофонов незначительно снижало вероятность его идентификации.

Таблица 1

Table 1

Вероятности правильного выбора дельфинами сигналов положительного класса из двух и трех одновременно звучащих источников

Probabilities of correct choice by dolphins of a positive class signals from two and three simultaneously sounding sources

Альтернативность выбора	Сигнал	Длительность импульса	Вероятность правильного выбора			Доверительный интервал
			Дельфин1	Дельфин2	Среднее	
Выбор из двух источников	А	92	0,88	0,90	0,89	$\pm 0,01$
		260	0,90	0,92	0,91	$\pm 0,01$
		560	0,90	0,90	0,90	$\pm 0,01$
	Б	92	0,88	0,88	0,88	$\pm 0,01$
		260	0,90	0,92	0,91	$\pm 0,01$
		560	0,88	0,92	0,90	$\pm 0,02$
	В	92	0,88	0,90	0,89	$\pm 0,01$
		260	0,91	0,92	0,92	$\pm 0,01$
		560	0,90	0,88	0,89	$\pm 0,01$
Выбор из трех источников	А	92	0,74	0,78	0,76	$\pm 0,02$
		260	0,76	0,80	0,78	$\pm 0,02$
		560	0,75	0,75	0,75	$\pm 0,01$
	Б	92	0,73	0,75	0,74	$\pm 0,01$
		260	0,75	0,75	0,75	$\pm 0,01$
		560	0,72	0,74	0,73	$\pm 0,01$
	В	92	0,74	0,74	0,74	$\pm 0,01$
		260	0,75	0,77	0,76	$\pm 0,01$
		560	0,73	0,75	0,74	$\pm 0,01$

Средняя вероятность правильной идентификации положительного класса сигналов при многоальтернативном выборе на фоне двух одновременно звучащих отрицательных составила 75 %. Сигналы с длительностью импульса 260 мкс также показали небольшое преимущество в распознавании и классификации (на 1–2 %). Дальнейшее увеличение пространственной неопределенности прихода полезного сигнала на фоне большого числа отрицательных оказалось невозможным и приводило к недостоверной работе животных по их распознаванию и классификации.

Полученные данные свидетельствуют о том, что классификация дельфинами шумовых сигналов в условиях пространственной неопределенности одновременного предъявления возможна и достаточно высока при простой пространственной альтернативе (два одновременно звучащих источника сигналов), но с ростом альтернативности выбора резко падает вероятность правильной работы животных (при трех источниках результат еще достоверный, при четырех уже нет). Работа решала задачи определения принципиальной возможности решения дельфином сложной задачи классификации шумов в условиях разной степени пространственной неопределенности их прихода.

В основе формирования пространственных характеристик слухового приема лежат физиологические механизмы бинаурального слуха, обеспечивающие направленное избирательное восприятие акустической информации из окружающего пространства и особенности ориентационного поведения вида [10]. Для лоцирующих животных направленное восприятие сигналов приобретает особо важное значение, т. к. именно эти животные постоянно сталкиваются с необходимостью отличать нужный полезный сигнал от похожих посторонних сигналов по небольшой разнице в углах падения звука [11, 12]. Способность слуховой системы отстраивать один сигнал от другого зависит от степени пространственного разнесения источников сигналов и свойственна ряду видов животных. 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 [13, 14]. У дельфина разнесение источников сигнала и шума в горизонтальной плоскости приводит к уменьшению маскирующего влияния шума на величину до 30 дБ [15, 16]. Такое же падение величины маскировки получено для летучих мышей [17]. При пространственном разнесении источников полезного сигнала происходит демаскировка, происходящая за счет наличия интерауральных различий в сигнале, 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 работают иные механизмы, облегчающие выделение звуковых сигналов на фоне шума: предварительная настройка слуховой системы при приеме соответствующих сигналов; оптимальная частота заполнения сигнала; достаточная сила сигнала.

4. Заключение

Проведенные нами ранее исследования [6–9] 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 представления сигнала внутри класса, т. е. при его растяжении-сжатии, что достигалось изменением длительности импульса внутри каждого класса. В настоящем исследовании показано, что слуховая система дельфина сохраняет высокую вероятность идентификации классов этих сигналов в условиях альтернативного выбора и пространственной неопределенности появления полезного сигнала, т. е. в условиях максимально приближенных к естественным. Пеленгация звуковых сигналов в естественных морских условиях является важнейшей функцией как слуховых систем морских животных, так и технических гидроакустических систем. Несмотря на то, что современные гидроакустические системы постоянно совершенствуются и в пеленговании источников полезных информационных сигналов, и в помехоустойчивости, живые биосонары по-прежнему отличаются большей эффективностью по точности работы, большей широкополосностью, а также меньшими размерами и энергопотреблением. Физиологические механизмы, используемые дельфинами при пеленговании и идентификации сложных акустических сигналов, представляют непосредственный интерес не только для биологов, но и для инженеров, работающих над техническими проблемами в теории обнаружения. Изучение механизмов, лежащих в основе высокой эффективности слуховой системы дельфинов, должно способствовать более глубокому пониманию адаптационных возможностей специализированных биологических анализаторных систем, формирующихся в эволюции, а также содействовать решению ряда важнейших технических задач, связанных с разработкой и совершенствованием систем гидролокации и систем подводной связи.

Финансирование

Работа выполнена в рамках гос. задания № 075-00967-23-00 на 2023 г.

Funding

The study was carried out within the framework of the State assignment No. 075-00967-23-00 for 2023.

Соблюдение этических стандартов

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.

Compliance with ethical prescriptions

All applicable international, national and/or institutional guidelines for the care and use of animals are followed in accordance with the principles of the Basel Assessment and the ARRIVE recommendations. This article does not contain any studies involving humans as study objects.

Литература

1. Лямин О.И., Корнева С.М., Рожнов В.В., Мухаметов Л.М. Китообразные и акустический шум: от наблюдений за поведением животных к регистрации физиологических реакций // Морские млекопитающие Голарктики. 2012. Т. 2. С. 41–47.
2. Абрамов А.П., Голубков А.Г., Королев В.И., Фрадкин В.Б. О помехозащищенности гидролокатора дельфина // Труды Акустического института. 1971. Вып. 17. С. 24–28.
3. Бурдин В.И., Марков В.И., Резник А.М., Скорняков В.М., Чуपाков А.Г. О способности черноморской афалины различать полезный сигнал на фоне шума // Морфология и экология морских млекопитающих. М., 1971. С. 106–111.
4. Дубровский Н.А. Эхолокационный анализатор черноморской афалины // Черноморская афалина *Tursiops truncatus ponticus*: морфология, физиология, акустика, гидродинамика / Под ред. Соколова В.Е., Романенко Е.В. Москва: Наука, 1997. 672 с.
5. Дубровский Н.А., Зориков Т.В., Квижинадзе О.Ш., Куратишвили М.М. Признаковое описание сигналов и принципы его организации в слуховой системе дельфина // Акустический журнал. 1991. Т. 37, Вып. 5. С. 933–937.
6. Зайцева К.А., Королев В.И., Ахи А.В. Распознавание дельфинами *Tursiops truncatus* классов шумоподобных сигналов // Журнал эволюционной биохимии и физиологии. 2008. Т. 44, № 2. С. 194–199.
7. Зайцева К.А., Королев В.И., Ахи А.В. Устойчивость пассивного слуха дельфина *Tursiops truncatus* к деформации спектра низкочастотного шума // Журнал эволюционной биохимии и физиологии. 2012. Т. 48, № 6. С. 573–578.
8. Зайцева К.А., Королев В.И., Ахи А.В. Чувствительность слуха дельфина *Tursiops truncatus* к полосовой фильтрации спектра низкочастотного шума // Журнал эволюционной биохимии и физиологии. 2015. Т. 51, № 2. С. 133–136.
9. 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 // Журнал эволюционной биохимии и физиологии. 2017. Т. 53, № 3. С. 215–217.
10. Альтман Я.А. Пространственный слух. СПб.: Институт физиологии им. И.П. Павлова, 2011. 312 с.
11. Дьяченко С.М., Королев Л.Д., Резвов Р.Н., Чемоданов Б.К. Исследования способности дельфина афалины определять направление на источник шумового сигнала // Труды Акустического института. 1971. Вып. 17. С. 43–46.
12. Попов В.В., Супин А.Я. Слух китов и дельфинов. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2013. 219 с.
13. Ebata M., Sone T., Nimura T. Improvement of hearing ability by directional information // The Journal of the Acoustical Society of America. 1968. Vol. 43, N 2. P. 289–297. doi:10.1121/1.1910778
14. Мамакин Ю.М. Характеристики бинаурального анализатора слуховой системы человека в свободном звуковом поле // Биофизика. 1974. Т. 19, № 6. С. 1069–1076.
15. Белькович В.М., Дубровский Н.А. Сенсорные основы ориентации китообразных Ленинград: Наука, 1976. 204 с.
16. Зайцева К.А., Акопиан А.И., Морозов В.И. Помехоустойчивость слухового анализатора дельфина как функция угла предъявления помехи // Биофизика. 1975. Вып. 3. С. 519–521.
17. Айрапетьянц Э.Ш., Константинов А.И. Эхолокация в природе. 2-е изд., перераб. и доп. Ленинград: Наука, 1974. 512 с.

References

1. Lyamin O.I., Korneva S.M., Rozhnov V.V., Mukhametov L.M. Cetaceans and acoustic noise: From observations of animal behavior to registration of physiological reactions. *Marine Mammals of the Holarctic*. 2012, 2, 41–47.
2. Abramov A.P., Golubkov A.G., Korolev V.I., Fradkin V.B. About dolphin's sonar noise immunity. *Proceedings of Acoustic Institute*. 1971, 17, 24–28 (in Russian).
3. Burdin V.I., Markov V.I., Reznik A.M., Skorniyakov V.M., Chupakov A.G. About the ability of Black Sea bottlenose dolphin to distinguish a useful signal against a background of noise. *Morphology and Ecology of Marine Mammals*. Moscow, 1971, 106–111 (in Russian).
4. Dubrovsky N.A. The Black Sea Bottlenose Dolphin: the Echo-location Analyzer. *The Black Sea Bottlenose Dolphin Tursiops truncatus ponticus: Morphology, Physiology, Acoustics, Hydrodynamics*. Ed. Sokolov V.E., Romanenko E.V. Moscow, Nauka, 1997. 672 p. (in Russian).
5. Dubrovsky N.A., Zorikov T.V., Kvizhinadze O. Sh., Kuratishvili M.M. Indicative Description of Signals and Principles of its Organization in the Dolphin's Auditory System. *Acoustical Physics*. 1991, 37(5), 933–937 (in Russian)
6. Zaitseva K.A., Korolev V.I., Akhi A.V. Recognition of classes of noise-like signals by dolphins *Tursiops truncatus*. *Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology*. 2008, 44, 2, 230–236. doi:10.1134/S0022093008020114
7. Zaitseva K.A., Korolev V.I., Akhi A.V. Passive hearing stability in the bottle-nosed dolphin *Tursiops truncatus* to low frequency noise spectrum deformation. *Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology*. 2012, 48, 2, 573–578 (in Russian).
8. Zaitseva K.A., Korolev V.I., Akhi A.V. Hearing sensitivity to band-pass filtration of low-frequency noise spectrum in the dolphin *Tursiops truncatus*. *Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology*. 2015, 51, 2, 152–155. doi:10.1134/S002209301502009X
9. Zaitseva K.A., Korolev V.I., Akhi A.V., Butyrskiy E. Yu. Perception of noises with temporally unstable frequency modulation of tonal components by the dolphin *Tursiops truncatus*. *Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology*. 2017, 53, 3, 241–244. doi:10.1134/S0022093017030097
10. Altman Ya.A. Spatial Hearing. *St. Petersburg, Pavlov's Physiology Institute*, 2011. 312 p.
11. Dyachenko S.M., Korolev L.D., Resvov R.N., Chemodanov B.K. Study of the ability of bottlenose dolphins to determinate the direction to the source of noise signal. *Proceedings of Acoustic Institute*. 1971, 17, 43–46 (in Russian).
12. Popov V.V., Supin A. Ya. Hearing of Whales and Dolphins. *KMK Scientific Press*, 2013. 219 p. (in Russian).
13. Ebata M., Sone T., Nimura T. Improvement of hearing ability by directional information. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1968, 43, 4, 289–297. doi:10.1121/1.1910778
14. Mamakin Yu.M. Characteristics of a binaural analyzer of the human auditory system in a free sound field. *Biophysics*. 1974, 19, 6, 1069–1076 (in Russian).
15. Bel'kovich V.M., Dubrovsky N.A. Sensory bases of cetacean orientation. *Leningrad, Nauka*, 1976. 204 p. (in Russian).
16. Zaitseva K.A., Akopian A.I., Morozov V.I. Resistance to noise of the auditory analyzer of the dolphin as a function of the angle of presentation of the interference. *Biophysics*. 1975, 20, 3, 531–534.
17. Ayrapetyants E.S., Konstantinov A.I. Echolocation in nature. *Leningrad, Nauka*, 1974. 512 p.

Об авторе

АХИ Андрей Валентинович, ORCID ID: 0000-0001-7498-3757; Scopus Author ID: 24398493700;
WoS ResearcherID: K-6341-2018; РИНЦ Author ID: 885246