

ВОЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ И НАЦИОНАЛЬНАЯ ОБОРОНА

УДК 681.883

DOI: 10.37468/2307-1400-2022-3-103-110

ВЛИЯНИЕ НЕСТАБИЛЬНОЙ ВО ВРЕМЕНИ ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИИ ТОНАЛЬНЫХ КОМПОНЕНТ СПЕКТРА ШУМОПОДОБНЫХ СИГНАЛОВ НА ИХ РАЗЛИЧЕНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЮ ДЕЛЬФИНАМИ *TURSIOPS TRUNCATUS*

**Ахи Андрей Валентинович¹
Бутырский Евгений Юрьевич^{2,3}**

¹ Институт эволюционной физиологии и биохимии им. И. М. Сеченова, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

³ Военно-морской политехнический институт Военного учебно-научного центра ВМФ «Военно-морская академия имени Адмирала Флота Советского Союза Н.Г. Кузнецова», Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Статья посвящена изучению локационных возможностей дельфинов, что имеет большую практическую направленность, связанную с обороноспособностью страны, ее безопасности на морских акваториях. В процессе изучения способности дельфинов воспринимать и классифицировать шумоподобные сигналы происходило поэтапное усложнение предлагаемой животным задачи путем искажения первоначальных сигналов и уничтожения в их спектре информационных признаков. В исследовании тональные компоненты спектра предъявляемых сигналов были нестабильны как по частоте, так и во времени. Показано, что добавленная нестабильность во времени, хотя и приводит к небольшому снижению эффективности распознавания, не является серьезным препятствием для слуховой системы дельфина. Анализ возможностей и природы биолокатора китообразных, дает возможность решения ряда технических и оборонных задач.

Ключевые слова: дельфин, шумоподобный сигнал, wobbling, распознавание.

THE INFLUENCE OF TIME-UNSTABLE FREQUENCY MODULATION OF NOISE-LIKE SIGNAL SPECTRA TONAL COMPONENTS ON THEIR RECOGNITION AND CLASSIFICATION BY DOLPHIN`S *TURSIOPS TRUNCATUS*

**Akhi A. V.¹
Butyrskiy E. Yu.^{2,3}**

¹ Sechenov Institute of Evolutionary Physiology and Biochemistry of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

² St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

³ Naval Academy named after Admiral of the Fleet of the Soviet Union N.G. Kuznetsov, St. Petersburg, Russia

ABSTRACT

The article is devoted to the study of the location capabilities of dolphins, which has a great practical focus associated with the country's defense capability, its security in the sea. The proposed task was gradually complicated by the distortion of the initial signals and the destruction of information signs in the spectrum during the process of studying the ability of dolphin`s to recognize classify noise-like signals. The tonal components of the presented signals spectrum were unstable in both frequency and time in the study. It was shown that the added instability over time, although it leads to a slight decrease in the recognition efficiency, is not a serious obstacle for the dolphin`s auditory system. An analysis of the capabilities and nature of the cetacean biolocator creates the possibility of solving a number of technical and defense problems.

Keywords: dolphin, noise-like signal, wobbling, recognition.

Введение

Сейчас, когда специальная военная операция, проводимая на Украине для искоренения коричневой чумы, переросла по сути дела в прямое столкновение России и Запада, возглавляемого США. При этом «цивилизация избранных» не стесняется в методах и средствах используемых для достижения своих целей: экономические санкции, откровенная ложь в медиа пространстве, бомбежки мирного населения в городах, игнорирование норм международного права, использование террора в отношении конкретных физических лиц и инфраструктурных объектов. Убийство М. Дугиной, подрыв газопроводов «Северный поток», Северный поток 2» и Керченского моста являются ярким тому свидетельством. Политика «промыывания мозгов» населения не только Украины, но всего мирового сообщества носит самый разнообразный характер и включает в себя: информационную войну, основанную на лжи и искажении фактов и русофобии, пересмотр итогов Второй мировой войны и другие исторические события, отключение и блокирование российских информационных каналов и сайтов в социальных сетях, развязывание беспрецедентной кибервойны в Интернет и т.д. Целевой установкой информационной войны является не только создание образа врага и получение корпорациями США и НАТО дополнительных ассигнований на развитие военно-промышленного комплекса, но и уничтожение России и овладение ее богатствами и территориями. США и страны НАТО уже не скрывают, что готовы идти до конца, вплоть до применения ядерного оружия.

Важной компонентой ВПК США, которой уделяется пристальное внимание, является изучение бионических методов, в частности, биолокатора дельфина, и возможности их применения в технических средствах. На настоящий момент на службе у Пентагона находятся не менее 100 дельфинов-афалин, калифорнийских морских львов и белух [1, 2]. Уже много лет основная база изучения и тренировки китообразных находится в Сан-Диего. Кроме

базы в Сан-Диего, существуют и другие, например, одна из них располагается недалеко от Сиэтла, штат Вашингтон. На базах их не только изучают, проводят целый комплекс мероприятий для получения основных навыков по охране акваторий, борьбе с подводными диверсантами, разминированием и т.д. Свои навыки млекопитающие неоднократно применяли в ходе военных операций ВМС США во Вьетнаме, Бахрейне, Ираке.

Эта информация свидетельствует о большой роли, которой придают ВМС США исследованиям с морскими животными и в особенности китообразных. Такой интерес, связан с перспективами использования локационных способностей дельфинов при построении гидроакустических систем и комплексов. Миллионы лет эволюции выработали у них, можно сказать выдающиеся адаптивные способности к обнаружению и классификации сигналов от объектов, в различных условиях. В частности, дельфины уверенно обнаруживают и классифицируют объекты, которые находятся не только в толще воды, но и в грунте (ил, песок). Локатор дельфина намного эффективней, чем современные гидроакустические средства. Но надо отметить, что для дельфина, в общем, не стоит так остро вопрос скрытности, как например, для подводной лодки (ПЛ). В этом отношении, конечно, гидроакустические средства надводных кораблей (НК) «роднее» дельфину, так как для НК скрытность в акустическом поле, хотя и важна, но не настолько как для ПЛ. Корабль можно наблюдать и визуально и в радиолокационном диапазоне частот и т.д.

В целом, исходя из вышесказанного, представленные в статье материалы исследований, посвященные изучению локационных возможностей дельфинов, являются актуальными и важными не только с точки зрения чисто научного интереса, но имеют большую практическую направленность, связанную с обороноспособностью страны, ее безопасности на морских акваториях, а также охране стратегических объектов и возможности использовать слуховые механизмы обработки

гидроакустических сигналов китообразными в технических системах.

Методика проведения эксперимента

Слуховая система дельфинов позволяет решать задачу определения направления на источник звука и его свойств как в активном режиме, когда объекты лоцируются сигналами, которые после отражения от объекта становятся источниками эхосигналов, так и в пассивном режиме при восприятии источников звука из окружающей среды. При изучении функциональных возможностей слуховой системы китообразных основное внимание уделялось механизмам и принципам обработки высокочастотных локационных гидроакустических сигналов. Чувствительность слуховой системы дельфина к приему сигналов низкой частоты из окружающей среды практически не исследовалась из-за существенных анатомо-морфологических преобразований. В последние годы в ряде исследований была показана способность слуховой системы китообразных воспринимать морские низкочастотные шумы и решать задачу их идентификации и классификации. Известно, что морские шумы имеют сложную спектральную структуру как по огибающей спектра (макроструктура), так и по спектральным компонентам в виде дискрет и тонкой структуры непрерывного спектра (микроструктура). Морской шум с информационной точки зрения т носит двоякий характер. С одной стороны, он является помехой для слуховой системы при приеме гидроакустических сигналов. С другой стороны, морской шум может быть сигналом, так как он несет полезную информацию о гидрофизических и биологических характеристиках океана, границах гидроакустического канала (воздух-вода, вода-дно) и других важных локальных и глобальных характеристиках акустического поля акватории Мирового океана, которые позволяют дельфину ориентироваться в окружающей обстановке. Мешающим фактором при приеме этих шумов морскими млекопитающими, являются помехи разнообразного происхождения (естественные и искусственные), искажающие их спектрально-временной образ.

Обработка любых сигналов решает целый ряд задач, а именно: обнаружение, распознавание, классификацию, идентификацию и т.д. Слуховая система дельфина также решает эти задачи. В работе [3] впервые множество независимых акустических признаков для спектров локационных сигналов было представлено в виде модели иерархически организованной системы. В этой модели признаки расположены в порядке значимости. Было выделено три основных признака: «макроструктура», «микроструктура» и энергия сигнала. При этом признаки «макроструктуры» и «микроструктуры» определяются различными масштабами изменения энергетического спектра сигнала.

В предыдущих работах авторов были представлены материалы исследований, где показана способность китообразных обнаруживать и классифицировать низкочастотные шумовые сигналы [4, 5]. Деформация спектральной микроструктуры этих сигналов путем периодического воздействия, приводящего к изменению высоты тона дискретных составляющих от 12 % до 100% [6, 7], а также искажение спектральной макроструктуры сигнала с помощью полосовых фильтров [8, 9] не привели к статистически значимому снижению вероятности различения шумов, кроме случая при 100 % разрушении дискретных составляющих. Как правило, все существующие звуковые сигналы не являются стационарными и их характеристики меняются во времени и по частоте. Наиболее часто влияние внешних факторов на сигнал приводит к частотной модуляции сигналов. Поэтому в экспериментах с дельфинами использовались сложные частотно-модулированные сигналы. Поэтому с целью выявления механизмов слухового анализа и возможностей слуховой системы при распознавании дельфином шумовых сигналов в настоящей работе использовались сложные частотно-модулированные сигналы, которые моделировали частотную нестабильность тональных компонент спектра сигналов в условиях её временной нестабильности.

При проведении эксперимента для моделирования шумов был использован имитатор сложных шумоподобных сигналов, позволяющий генерировать множество шумовых процессов в диапазоне частот 150 Гц÷20 кГц, путем формирования непрерывной псевдослучайной последовательности импульсов разной полярности. Временная последовательность импульсов, кодированная определенным образом, задавала отличительный признак класса сигналов, одна (1) имела код 10100000, другая (2) – 10100110. Имитатор предоставлял возможность изменения частоты следования импульсов, которая приводила к изменению частотно-временного масштаба шумового процесса без искажения формы энергетического спектра. Каждый класс сигналов содержит импульсы, разделенные по длительности на три режима [4-7]:

$$A - \tau_1 = 92 \text{ мкс}, \quad B - \tau_2 = 560 \text{ мкс},$$

$$C - \tau_3 = 260 \text{ мкс},$$

где τ – длительность минимального импульса и минимальной паузы.

С помощью изменения задержки τ достигалась возможность растяжения (сжатия) сигнала во времени (что приводит к его сжатию (растяжению) по частоте) при сохранении его временного ритмического кодирования, т.е. его инвариантности (рис.1). Генератор сигналов специальной формы, находящийся в приборе, позволил проводить частотную модуляцию тональных компонент смоделированных сигналов, изменяющуюся во времени, и дискретных составляющих спектральных сигналов, что приводило к модуляции дискретных компонент спектра сигнала, нестационарность которых происходила как по частоте, так и по времени. Пределы изменения частоты дискретных составляющих задаются формулой

$$\Delta f(t) = f_{0i} + \Delta f_{mi}(t),$$

где $\Delta f(t)$ – девиация частоты сигнала;

f_{0i} – центральная частота i -й дискретной составляющей;

$\Delta f_{mi}(t)$ – модуляция (вобуляция) i -дискретной составляющей, как функция от времени,

$$\Delta f_{mi} = \frac{\Delta f_{\max} - \Delta f_{\min}}{2}.$$

Индекс модуляции m определяется по формуле:

$$m_i = \frac{\Delta f_{mi}}{\Delta f_{0i}} = \frac{2 \left(\Delta f_i + \frac{\Delta f_{mi}}{2} \right)}{f_{0i}} = \frac{2\Delta f_i + \Delta f_{mi}}{f_{0i}},$$

m_i – глубина модуляции для i -дискретной составляющей.

Изменение модуляции, как функции от времени, происходило как с постоянной вобуляцией (рис.1а), так и по четырём временным функциям – прямоугольной (рис.1б), пилообразной (рис.1в), трапецевидной (рис.1г) и шумообразной (рис.1д). Введенная нестабильность по частоте и времени преобразует спектральную структуру исследованных низкочастотных шумоподобных сигналов по макро и микроструктуре, что может затруднить обработку и распознавание сигналов механизмами спектрального анализа. На рис.1 обозначено: горизонтальные оси f – частота, а вертикальная ось t – время, A – амплитуда спектра.

Натурный эксперимент проводился в свайно-сетевом вольере размером 10×7×6 м морской бухты методом двигательного-пищевых условных рефлексов на двух дельфинах, ранее принимавших участие в акустических опытах и обученных к распознаванию шумоподобных сигналов [4-7].

Источником гидроакустических сигналов является гидрофон (пьезокерамическая сфера \varnothing 20 мм с шириной полосы пропускания 0,15÷120 кГц), погруженный на глубину 50 см. Звуковое давление, приведённое к 1 м, в полосе 1 Гц составило 80 дБ относительно 1 мкПа при шуме моря ~ 50 дБ. Стартовая позиция дельфина находилась на расстоянии 6 м от излучателя-гидрофона. Сигналы предъявлялись последовательно.

Когда дельфин принимал правильное решение по распознаванию положительного сигнала, дельфин ударял рострумом по манипулятору и получал за вознаграждение в виде рыбы. Если сигнал был отрицательный, то он должен был находиться на месте. Когда он неправильно реа-

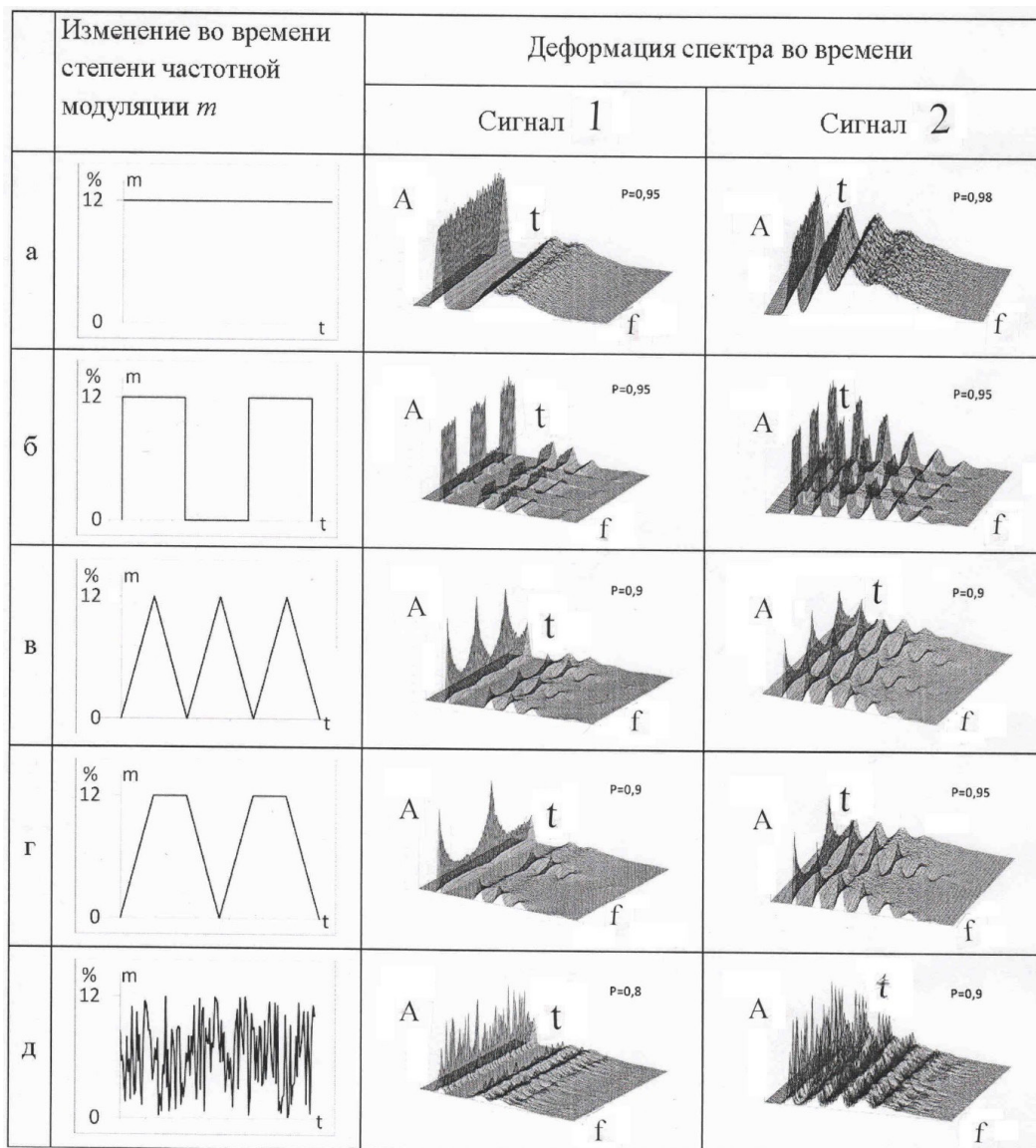


Рисунок 1 – Трёхмерные спектры модулированных сигналов 1 и 2 и временная нестационарность величины модуляции в различных режимах.

гировал на положительный или отрицательный сигнал, то такое поведение не поощрялось кормлением рыбой. В начале, в процессе обучения дельфинам предъявлялись не вобулированные сигналы. Для одного дельфина сигналы первого класса были положительными, второго класса – отрицательными. Для другого дельфина – наоборот. После того, как дельфины были обучены распознавать классы сигналов, сигналы были подвержены вобуляции. Таким образом, каждому животному предъявлялся набор из 15 положительных и 15 отрицательных сигналов (пять частотно-временных модуляций сигнала в трех частотно-временных масштабах). В каждом эксперименте, разновидность сигнала, изменяемая по различ-

ным временным законам модуляции (вобуляции), предъявлялась животному по 100 раз, что обеспечивало вполне репрезентативную выборку.

Результаты натурального эксперимента и интерпретация статистической обработки данных

На основании проведенного натурального эксперимента была проведена статистическая обработка полученных данных. Результаты экспериментов в виде оценок вероятностей обнаружения и классификации дельфином предъявляемых ему сигналов показаны на рис.1. В каждой серии экспериментов была получена высокая вероятность правильного обнаружения (классификации) $P > 0,8$, а уровень значимости при этом имел

значение $p < 0,01$. Введение любой нестационарности во времени частотной модуляции тональных компонент шумового сигнала, период которых превышал время накопления сигнала, не приводило к статистически значимому падению эффективности классификации предъявляемых дельфину сигналов (падение не превышало $3 \pm 15\%$).

Таким образом, очевидно, что, спектральные поверхности шумового сигнала, показанные на рис.1 хотя, и являются важными классификационными признаками, но их стабильность (нестационарность) не является критически необходимым условием успешного решения задачи распознавания. Так как, частотная модуляция сигнала по описанным выше законам (рис.1), не привела к критически значимому уменьшению вероятности обнаружения и классификации низкочастотных шумов по определенному инвариантному признаку, то можно в качестве гипотезы предположить, что период изменения модуляции превышает среднее время накопления сигнала, которое связано с когерентностью принимаемого сигнала. Кроме того, необходимо отметить, что увеличение входного отношения сигнал-помеха, акустического сигнала, поступающего может создать благоприятные условия для идентификации классов сигналов.

Как показал натурный эксперимент даже значительная деформация спектральной плотности шумового сигнала не приводит к критическому падению вероятности его обнаружения и показывает, что дельфин может использовать информацию не только в энергетическом, но и в фазовом спектре сигнала [10]. Вероятное использование дельфином фазового спектра сигнала позволяет выдвинуть это предположение в качестве гипотезы, поскольку только в этом случае он способен обеспечить наибольшую достоверность передачи информации. Знания фазового спектра сигнала и обеспечивает его сжатие (согласованный фильтр) и выделение на фоне помех и шумов. Для подтверждения этого предположения необходимо провести экспериментальное исследование по восприятию дельфином широкополосных и

сложных сигналов в пассивном режиме, в которых варьируется время когерентности шумовых сигналов и интервал модуляции. Перед исследованиями стоит необходимость проведения анализа фазового спектра и оценки времени накопления для получения оптимального отношения сигнал-помеха с учётом помеховой обстановки и искажения сигнала. Необходимо также ответить, что использование фазового спектра позволяет, даже при искажении энергетического спектра, реализовывать приемник по эффективности близкий к оптимальному и получать отношение сигнал/помеха близкое к потенциальному. Поэтому маловероятно, что природа в течении миллионов лет эволюции и мутаций дельфинов отказалась от возможности использовать фазовую структуру сигналов для обеспечения их выживаемости. Подтверждением этого факта является, то, что характеристики обнаружения гидроакустического сигнала у дельфинов уж никак не хуже, чем у современных гидроакустических систем. Последнее как раз и свидетельствует, о том, что дельфин с помощью своего биолокатора учитывает тонкую структуру сигнала, а не только огибающую. В связи с этим, хочется еще раз – необходимо интенсифицировать исследования, связанные с возможностями биолокатора дельфина, так как это носит не только чисто научный интерес, но имеет огромное прикладное значение для обороноспособности страны. Если враг активно занимается этими вопросами, вкладываясь десятками миллионов долларов, значит России тоже необходимо, хотя бы возродить, то что было до распада Советского Союза.

Выводы

На основании материалов, представленных в статье можно сделать следующие выводы:

1. При приеме гидроакустического сигнала дельфин с помощью своей слуховой системы, помимо спектрального, производит временной анализ структуры акустических стимулов.
2. Любая периодичность, которая находится в принимаемом гидроакустическом сигнале, служит дополнительным признаком, учитывая который можно обеспечить более «комфортные»

условия решение задач обнаружения, классификации, различения и распознавания подводных объектов.

3. Восприятие дельфином гидроакустического сигнала происходит как анализ единого частотного, временного и фазового образа.

4. Слуховая система дельфина, в результате эволюции и мутаций, хорошо адаптировалась воспринимать акустические сигналы в водной среде при различных условиях наблюдения, которые могут меняться вследствие того, что гидроакустический канал является нестабильным, так как его параметры меняются по временным и пространственным координатам.

5. Изучение принципов действия и природы механизмов, обеспечивающих высокую эффективность работы слуховой системы дельфина при решении задач обнаружения и классификации, важны для понимания его адаптационных возможностей, как биологической анализаторной системы.

6. Анализ возможностей и природы биолокатора китообразных, дает ключ к решению ряда технических и оборонных задач по разработке и усовершенствованию гидроакустических систем обнаружения, классификации и связи в интересах ВМФ РФ, охране водных районов и акваторий, обнаружении биоресурсов, мониторинга водной среды и контроля важных объектов инфраструктуры.

7. В целом, исходя из интересов государства Российского, необходимо возродить программы по исследованию морских млекопитающих. Раз наши враги этим занимаются, значит это имеет большие перспективы для использования механизмов их звуковидения для интересов государства. В противном случае мы безнадежно отстанем и в этой области, как это было в микроэлектронике, IT-технологиях, автомобилестроении и т.д.

Работа поддержана госбюджетом по государственному заданию на 2021-2023 годы (Рег. ААА-А-18-118013090245-6). Обработка экспериментальных данных проведена на базе ЦКП Института эволюционной физиологии и биохимии им. И.М. Сеченова РАН.

Список литературы

1. Морские млекопитающие на военной службе [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://topwar.ru/73947-morskie-mlekopitayuschie-na-voennoy-sluzhbe.html?ysclid=lae4r72ppb568165608>
2. США отправляют на Черное море боевых дельфинов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://iz.ru/news/569579?ysclid=lae51gz04h932295000>
3. Дубровский Н.А., Зориков Т.В., Квижинадзе О.Ш., Куратишвили М.М. Признаковое описание сигналов и принципы его организации в слуховой системе дельфина // Акуст. журн. – 1991. – Т. 31. – № 4. – С. 18-24.
4. Зайцева К.А., Королев В.И., Ахи А.В. Распознавание дельфинами *Tursiops truncatus* классов шумоподобных сигналов // Ж. эвол. биохим. и физиол. – 2008. – Т. 44. – № 2. – С. 194-199.
5. Зайцева К.А., Королев В.И., Ахи А.В., Бутырский Е.Ю., Сапрыкин А.В. Способность дельфинов к восприятию и классификации низкочастотных сигналов. // Национальная безопасность и стратегическое планирование. – 2016. – № 4(16). – С. 28-38.
6. Зайцева К.А., Королев В.И., Ахи А.В. Устойчивость пассивного слуха дельфина *Tursiops truncatus* к деформации спектра низкочастотного шума. // Ж. эвол. биохим. и физиол. – 2012. – № 6. – Т. 48. – С.573-578.
7. Зайцева К.А., Королев В.И., Ахи А.В., Кривченко А.И., Бутырский Е.Ю., Сапрыкин А.В. Эффективность обнаружения дельфином *Tursiops truncatus* низкочастотных шумов в условиях частотной модуляции в дискретных составляющих их спектров // Национальная безопасность и стратегическое планирование. – 2017. – № 1(17). – С. 43-53.
8. Зайцева К.А., Королев В.И., Ахи А.В. Чувствительность слуха дельфина *Tursiops truncatus* к полосовой фильтрации спектра низкочастотного шума. // Ж. эвол. биохим. и физиол. – 2015. – № 2. – Т.51. – С.130-136.
9. Зайцева К.А., Королев В.И., Ахи А.В., Кривченко А.И., Бутырский Е.Ю. Влияние фильтрации спектра шумового сигнала

на эффективность его распознавания дельфином *Tursiops truncatus* // Национальная безопасность и стратегическое планирование. – 2017. – № 2(18). – С. 63-73.

10. Варакин Л.В. Теория сложных сигналов. – М.: Сов. Радио, 1970. – 375 с.

Статья поступила в редакцию 27 июля 2022 г.
Принята к публикации 16 сентября 2022 г.

Ссылка для цитирования: Ахи А.В., Бутырский Е.Ю. Влияние нестабильной во времени частотной модуляции тональных компонент спектра шумоподобных сигналов на их различение и классификацию дельфинами *Tursiops truncatus* // Национальная безопасность и стратегическое планирование. 2022. № 3(39). С. 103-110. DOI: <https://doi.org/10.37468/2307-1400-2022-3-103-110>

For citation: Akhi A.V., Butyrskiy E. Yu. The influence of time-unstable frequency modulation of noise-like signal spectra tonal components on their recognition and classification by dolphin's *Tursiops truncatus* // National security and strategic planning. 2022. № 3(39). pp. 103-110. DOI: <https://doi.org/10.37468/2307-1400-2022-3-103-110>

Сведения об авторах:

АХИ АНДРЕЙ ВАЛЕНТИНОВИЧ – старший научный сотрудник, Институт эволюционной физиологии и биохимии им. И.М. Сеченова Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Россия

БУТЫРСКИЙ ЕВГЕНИЙ ЮРЬЕВИЧ – доктор физико-математических наук, профессор кафедры теории управления Санкт-Петербургского государственного университета, профессор кафедры гидроакустики, Военно-морской политехнический институт Военного учебно-научного центра ВМФ «Военно-морская академия имени Адмирала Флота Советского Союза Н.Г. Кузнецова», г. Санкт-Петербург, Россия
e-mail: evgenira88@mail.ru

Information about authors:

Akhi Andrey V. – Senior Researcher, Sechenov Institute of Evolutionary Physiology and Biochemistry of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

Butyrskiy Eugene Yu. – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Management Theory of St. Petersburg State University, Professor of the Hydroacoustics Department of Naval Academy named after Admiral of the Fleet of the Soviet Union N.G. Kuznetsov, St. Petersburg, Russia
e-mail: evgenira88@mail.ru