

УДК 681.519

**ЗАЙЦЕВА КИРА АЛЕКСАНДРОВНА,
КОРОЛЕВ ВАЛЕНТИН ИВАНОВИЧ,
АХИ АНДРЕЙ ВАЛЕНТИНОВИЧ,
КРИВЧЕНКО АЛЕКСАНДР ИВАНОВИЧ,
БУТЫРСКИЙ ЕВГЕНИЙ ЮРЬЕВИЧ**

ВЛИЯНИЕ ФИЛЬТРАЦИИ СПЕКТРА ШУМОВОГО СИГНАЛА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЕГО РАСПОЗНАВАНИЯ ДЕЛЬФИНОМ *TURSIOPS TRUNCATES* *

АННОТАЦИЯ

В статье рассмотрены вопросы, связанные с восприятием дельфином низкочастотных сигналов окружающей среды. Показано, что способность слуховой системы дельфинов воспринимать, идентифицировать и классифицировать низкочастотные морские шумы, является важным источником полезной информации для них. Эксперимент, подтвердил, что акустическая система дельфина либо способна восстановить утраченные участки спектра, либо использует временные механизмы работы при распознавании сложных акустических сигналов независимо от временных масштабов.

Ключевые слова: дельфин; шумовой сигнал; сигнал; время; частота; спектр.

**ZAYTSEVA K.A.,
KOROLEV V.I.,
AKHI A.V.,
KRIVCHENKO A.I.,
BUTYRSKIY E. YU.,**

INFLUENCE OF SPECTRUM FILTERING NOISE SIGNAL ON THE EFFECTIVENESS OF ITS RECOGNITION OF *TURSIOPS TRUNCATES* DOLPHIN

ABSTRACT

This article examines the issues associated with the perception of low-frequency environmental signals, dolphins Wednesday. It is shown that the auditory system's ability to perceive, identify, and dolphins classified low-frequency ocean noise is an important source of useful information for them. The experiment confirmed that the speaker system is capable to recover lost or dolphin plots range, or uses temporary recognition mechanisms of complex acoustic signals regardless of time scales

Keywords: dolphin; noise signal; signal; time; frequency; spectrum.

Введение

Традиционные активные гидроакустические системы (ГАС) в качестве несущего колебания при передаче информации используют гармонические или квазигармонические колебания. В процессе совершенствования гидроакустических систем созданы излучающие антенны с

расширенной полосой пропускания, что позволяет излучать сигналы с частотной модуляцией и манипуляцией с шириной полосы частот не более 10-20% от несущей. Однако дальнейшее расширение полосы пропускания мощных излучающих антенн связано с ограничениями технологического характера, что приводит к ком-

* Работа выполнена в Институте эволюционной физиологии и биохимии им. И.М. Сеченова РАН.

плексу проблем, свойственных традиционным узкополосным волновым сонарам: интерференция и многократное отражение от препятствий; низкая скрытность и проникающая способность сигнала, слабая помехоустойчивость и информационная незащищенность каналов передачи данных.

Как известно, риск столкновения подводной лодки с подводной лодкой связан с принципиальным противоречием освещения подводной обстановки, требованиями максимальной дальности обнаружения цели и минимальной дистанции скрытности. Степень заметности гидроакустических средств наблюдения определяется не только мощностью и характеристикой направленности излучающей антенны, но и пространственно-частотно-временными параметрами сигналов. Именно перечисленные выше факторы определяют задачу, которая направлена на исследование биологической акустической системы в условиях, приближенных к естественной сигнально-помеховой обстановке [1,2,3]. Создание гидроакустических систем, основанных на принципах, лежащих в основе локационной системы дельфина, является актуальной задачей для обороноспособности страны, так как ни одна подводная лодка не способна выполнять свои задачи без гидроакустических средств, которые есть ее глаза и уши. Необходимо отметить, что, несмотря на большое количество работ посвященных биолокационной системе дельфина недостаточное внимание уделялось исследованию восприятия дельфинами посторонних шумов и помех, которыми заполнен океан (соответствует режиму шумопеленгования ГАС). Этот режим является основным в деятельности подводных сил и средств ВМФ России. В связи с этим, тематика исследования, часть результатов которой изложены в настоящей статье, является важной и актуальной как в теоретическом, так и практическом плане.

Краткий анализ предметной области исследования

Одним из наиболее перспективных направлений изучения физиологии является изучение механизмов биолокации дельфинов в различных условиях внешней среды, к жизнедеятельности

в экстремальных условиях внешней среды. При исследовании эхолокационных сигналов афалины в лабораторных условиях, показано, что дельфин использует короткие широкополосные сигналы, что позволяет повысить точность определения координат и скорость перемещения объекта. Техническая реализация таких систем является сложной задачей, в то время как биологическая система успешно справляется с обработкой и выделением полезной информации из большого информационного потока. Актуальность исследования биоакустических возможностей морских млекопитающих подтверждается большим интересом к теме отечественных и зарубежных исследователей. После выхода в свет книги Келлога «Дельфины и сонар» (Kellogg W. N., 1961) был организован ряд крупных международных симпозиумов по этой проблеме и издано значительное число работ (Tavolga, U. ed., 1964, Norris, K. S., 1964; R. G. Busnel, 1967; R. G. Busnel and M. P. Fish, 1989; P. E. Nachtigall, 1988; J. A. Thomas, 1992; R. A. Kastelein, 1995; В. Е. Соколов, 1997 и др.). Исследования акустики дельфинов активно поддерживаются федеральными агентствами США (ONR, NASA), а также такими крупными компаниями как IBM. Возможностям дельфина (*Tursiops truncatus*) при обнаружении и распознавании подводных объектов посвящены исследования [1-4]. В них достаточно подробно и доказательно рассмотрены вопросы: характеристик дистантных сенсорных систем у китообразных, пространственные характеристики приемной и излучающей системы дельфина, параметры локационной активности дельфина афалины, сигналы, излучаемые китообразными в естественных акустических условиях, а также сигналы, излучаемые в лабораторных условиях, адаптивное акустическое поведение и методические приемы изучения эхолокации у китообразных.

Основные результаты, которые были сделаны в работах исследования акустического поведения дельфина [1-4]. В «экстремальных» акустических условиях животное активно использует адаптивные возможности своего гидролокатора. Это выражается в подстройке излучения под конкретную решаемую им задачу. Дельфин способен в статическом режиме локации обнару-

живать подводные объекты в естественном акустическом фоне на дистанции до 600 м. Получено математическое описание сверхширокополосных сигналов «без несущей» при моноимпульсном и мультиимпульсном режимах эхолокации [3].

То, что у дельфина необычайно развитый слух, известно давно. Объемы тех отделов мозга, которые заведуют слуховыми функциями, у него во много раз больше, чем у человека (при том, что общий объем мозга примерно одинаков). Дельфин способен воспринимать частоты звуковых колебаний, в 10 раз более высокие (до 150-180 кГц), чем человек (до 15-18 кГц), и слышит звуки, мощность которых в 10-30 раз ниже, чем у звуков, доступных слуху человека. Но чтобы ориентироваться в обстановке с помощью слуха, мало только слышать их, нужно еще тонко отличать один звук от другого. Слух человека и животного работает как набор частотных фильтров, каждый из которых откликается на свою частоту колебаний. Чтобы анализ был точным, настройка частотных фильтров должна быть острой. Чем острее настройка, тем меньшая разница частот доступна для различения, тем выше частотная разрешающая способность (ЧРС) слуха. Но звук – не просто набор разных частот. Каждая из них еще меняется во времени: становится то сильнее, то слабее. Слуховая система должна отслеживать эти быстрые изменения, и чем лучше она это делает, тем богаче сведения о свойствах звука. Поэтому помимо ЧРС, очень важна временная разрешающая способность (ВРС). Обе эти характеристики и определяют способность животного отличать один звук от другого [5,6]. При воздействии звука много клеток возбуждается одновременно, и продуцируемые ими потенциалы складываются в довольно мощный электрический сигнал, называемый *вызванным потенциалом* (ВП). ВП можно зарегистрировать, прикоснувшись контактным электродом к поверхности головы; такая процедура совершенно безвредна для животного. ВП – хороший показатель того, слышит ли дельфин звук. Если после подачи звука возник ВП, значит, слуховая система реагирует на этот звук. Если величина ВП падает, звук воспринимается на пределе возможного. Если ВП нет – скорее всего, звук не слышен.

Для измерения ЧРС используется прием, называемый маскировкой. Сначала дается пробный сигнал – звук определенной частоты, который вызывает электрический ответ мозга – ВП. Затем к звуку добавляется другой звук – помеха, заглушающая пробный сигнал, который становится хуже слышимым, при этом амплитуда ВП падает. Чем сильнее помеха, тем сильнее заглушение. При исследовании дельфина и его остроты слуховых фильтров, настроенных на разные звуковые частоты, прежде всего, была выявлена исключительно высокая ЧРС, особенно в области высоких звуковых частот (десятки кГц). Здесь уровень ЧРС доходит до 50 единиц, т. е. слух дельфина различает частоты, различающиеся примерно на 1/50. Это в 4-5 раз лучше, чем у других животных и у человека. Но такая высокая избирательность наблюдается только в области высоких звуковых частот, не воспринимаемых человеком. В том диапазоне, который доступен и человеку, и дельфину, избирательность слуха дельфина заметно меньше – примерно как у человека.

При изучении ВРС были получены впечатляющие результаты: ВРС у дельфина оказалась не в два-три и даже не в десять раз выше, чем у человека, а в десятки (почти в сто) раз. Слух человека позволяет различать интервалы времени примерно от одной сотой секунды (10 мс). Дельфины же различают интервалы в десятитысячные доли секунды (0.1-0.3 мс). Разрыв в звуке, длящийся 0.1 мс, вызывает хоть и небольшой, но различимый ВП. То же наблюдается и при действии других пробных звуков. Два коротких звуковых импульса отличаются от одного, когда интервал между ними составляет всего 0.2-0.3 мс (у человека – несколько мс). Пульсации громкости звука вызывают ответы, когда их частота приближается к 2 кГц (у человека – 50-70 Гц).

Для человека и многих животных ЧРС и ВРС слуха довольно близки, и поэтому казалось, что это является пределом возможности для природы. Из теории сигналов известно, что существует неизбежное противоречие между частотной и временной разрешающей способностью: чем лучше ЧРС, тем хуже ВРС, и наоборот. Это противоречие известно как *принцип неопределенности*. Эта закономерность справед-

лива для любой колебательной системы: если система обладает высокой избирательностью по частоте, то она имеет низкое разрешение во времени. Это выражается простым соотношением: $Q = F / B$, где Q – острота частотной селективности, F – частота, на которую настроен фильтр, и B – полоса пропускания фильтра, т. е. тот набор частот, который он пропускает. Темп, с которым может меняться амплитуда сигнала, зависит от полосы B : чем она шире, тем более быстрые изменения сигнала пропускаются фильтром, но тем «тупее» фильтр (меньше Q). Поэтому слуховая система должна найти некоторый компромисс между ЧРС и ВРС, ограничив обе эти характеристики на некотором уровне. Улучшение одной из них возможно только за счет ухудшения другой. Но противоречие между ЧРС и ВРС становится, менее драматическим, по мере увеличения частоты F : при высокой частоте можно сочетать широкую полосу B с острой избирательностью Q . Именно это и характерно для слуха дельфина, который освоил диапазон ультразвуковых частот. Значит, ЧРС и ВРС реально обусловлены не пределом возможности для слуховой системы, а разумным компромиссом между этими двумя характеристиками.

Ряд свойств локационного аппарата дает дельфину преимущества, которыми он не обладал бы, пользуясь лишь зрением. Для зрения большинство предметов непрозрачно. Ультразвук же проникает внутрь подводных предметов и отражается многократно от различных поверхностей раздела сред. Поэтому для лока-

тора китообразных большинство предметов полупрозрачно, что дает возможность животному исследовать их внутреннюю структуру. На этой основе, очевидно, и происходит распознавание дельфином одинаковых по размеру и форме предметов (например, шаров), но изготовленных из разных материалов и даже разных металлов [5,6].

Анализ показывает, что в последние годы увеличилось число работ посвященных коммуникационных сигналов, которые являются подводной связью между дельфинами. В этом случае дельфин воспринимает уже не отраженные сигналы, а сигналы от других дельфинов или шумы и помехи искусственного или естественного происхождения. В частности, в работе [4] представлены результаты экспериментальных исследований биосенсорной системы дельфинов, использующих акустический канал для поиска и распознавания подводных объектов, ориентации в трехмерном пространстве и подводной связи между особями. Анализируется работа сонара дельфина *Tursiops truncatus* в сложных условиях акустических помех. Показано, что основными механизмами, обеспечивающими помехозащищенность сонара дельфина является: излучение широкополосных импульсов с нулевой несущей, использование пачек импульсов (накопление), переменной частоты следования пачек импульсов (временная селекция) и пачек импульсов с интервальновременным кодированием. На рис.1 представлены амплитудно-частотные характеристики импульсов дельфина при

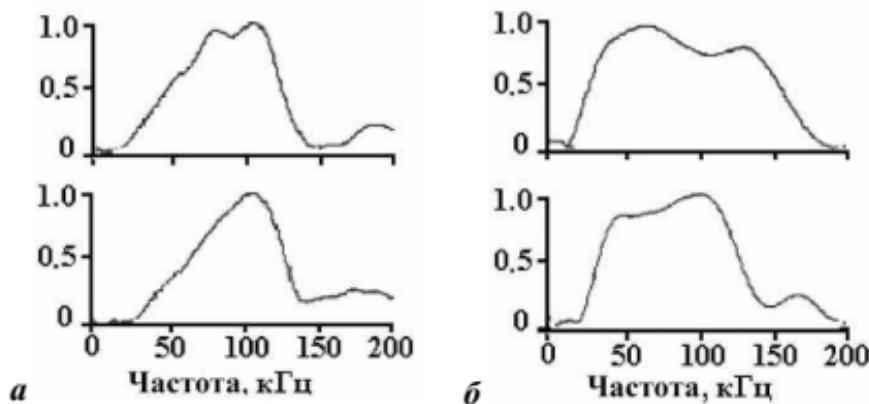


Рисунок 1 – Амплитудно-частотные характеристики импульсов дельфина при решении задачи обнаружения а – в естественном акустическом фоне; б – при воздействии искусственных помех

решении задачи обнаружения в естественном акустическом фоне (рис.1а) и при воздействии искусственной помехи (рис.1б). Как видно из представленных амплитудно-частотных характеристик, при воздействии искусственных помех дельфин меняет ширину спектра импульса. Спектр импульса не имеет определенного максимума и практически равномерен в диапазоне частот от 30 до 140 кГц. Импульс дельфина можно рассматривать как сигнал с нулевой несущей (без несущей), так как сигнал сосредоточен во времени и является широкополосным с неопределенным спектральным максимумом.

Таким образом, как вывод можно отметить, что при изучении функциональных возможностей слуховой системы эхолоцирующих морских млекопитающих основное внимание уделялось механизмам и принципам обработки высокочастотных зондирующих импульсов. Чувствительность этих животных к восприятию низкочастотных сигналов окружающей среды практически не изучалась из-за существенных морфофункциональных преобразований, которые произошли во всех структурах слухового пути в связи с реадaptацией к водному образу жизни. Отсутствие ушных раковин, зарастание наружного слухового прохода, смещение максимума слуховой чувствительности в область высоких частот поставили под сомнение возможность восприятия дельфинами звуковых сигналов низких частот. Особые требования к звуковосприятию в процессе активной локации направили исследователей на поиски нетрадиционных путей проведения звука и новых рецепторных образований для восприятия эхосигналов. Была выдвинута гипотеза [5] о формировании нового пути проведения звука через жировой тяж нижней челюсти, обеспечивающий проведение звуков высокой частоты. Исходя из современных представлений о том, что эхолокационная система дельфинов обладает двумя типами слуха: локационным, который работает в ультразвуковом диапазоне от 30 до 140-200 кГц и обзорно-круговом, работающим на низких частотах 1-30 кГц, возникает вопрос о путях проведения и возможности восприятия звуков столь широкого диапазона. В одной из ранних работ [6] экс-

периментально было показано, что в проведении звуковых колебаний принимает участие наружный слуховой проход и нижняя челюсть. Звуки частотой ниже 30 кГц поступают к кохлеарному аппарату через заросший слуховой проход. Для частот свыше 30 кГц главный путь прохождения звука – нижняя челюсть. В электрофизиологических работах последних лет полученные данные нашли подтверждение [7]. На представителях двух семейств подотряда зубатых китов (афалины, белухи) обнаружены акустические окна для звуков низких и высоких частот. Однако, некоторые авторы [8] полагают, что звукопроводение высокочастотных сигналов посредством нижней челюсти для эхолоцирующих животных нерационально, так как соединение *bulla tympanica* с черепом у дельфинов осуществляется посредством очень короткой и жесткой сухожильной связки. Эта связь представляет собой малоинерционную систему, способную передавать ультразвуковые сигналы с костей черепа, и акустические сигналы с минимальными потерями поступают непосредственно на элементы среднего уха. Несмотря на некоторые расхождения в представлениях о путях проведения звуков большинство исследователей в настоящее время не исключают возможности восприятия дельфинами звуков сигналов низких частот.

В работе [9] была показана способность слуховой системы дельфинов воспринимать, идентифицировать и классифицировать низкочастотные морские шумы. Шумы в океане являются не только фактором маскировки обнаруживаемых животными сигналов, но часто становятся важным источником полезной информации для них. Шумы любого происхождения имеют широкое многообразие спектральной картины как по макроструктуре (оггибающей спектра), так и по микроструктуре (распределению дискретных составляющих). Восприятие этих сигналов дельфинами в естественной среде обитания происходит на фоне помех различного происхождения, которые искажают их спектральную структуру. Показано [10-12], что при разрушении микроструктуры спектра низкочастотного шума путём модуляции дискретных составляющих спектра от 12 до 100% происходит искажение спектра, которое, однако, не приво-

дит к снижению эффективности идентификации опознаваемых шумов.

Условия проведения эксперимента

В настоящей работе рассматривается обнаружение, идентификация и классификация дельфином сложных акустических сигналов, максимум амплитуды дискретных составляющих которых сосредоточен в области низких частот, и поиск механизмов, обеспечивающих их восприятие при искажении макроструктуры спектра, которая достигалась путём фильтрации сигнала полосовыми фильтрами разных частот. Такая постановка эксперимента приближается к условиям формирования акустического поля естественной среды обитания, где практически все сигналы подвержены существенным искажениям.

Для формирования сигналов использовался многоканальный имитатор сложных шумовых сигналов, позволяющий производить многообразие шумовых процессов в диапазоне частот 150 Гц – 20 кГц. В основу имитации был положен метод образования широкополосных сигналов, представляющих собой кодовую псевдослучайную последовательность прямоугольных импульсов с амплитудной модуляцией (от 0 до \max). В псевдослучайной последовательности, в отличие от случайной, изменение выходного напряжения происходит с частотой, кратной частоте тактовых импульсов, и последовательность имеет период. Кодирование временной последовательности импульсов задавало отличительный признак класса сигналов. Управляемый генератор вырабатывает последовательность импульсов, которые поступают на дешифратор, преобразующий ее в параллельный восьмиразрядный код, формирующий последовательность видеоимпульсов прямоугольной формы. После усилителя сигнал поступает на гидрофон. В результате акустический процесс на выходе преобразователя получает шумоподобный характер. Сигналы в одном периоде длительностью 8τ (τ - длительность минимального импульса и минимальной паузы) представляют кодированную последовательность прямоугольных импульсов заданной длительности с определенными временными паузами между ними. Три класса сигналов имели

определённый временной код: I класс - 11110000, II и III классы - соответственно 10100000 и 10100110, где 1 – импульс длительностью τ , 0 – пауза длительностью τ . Внутри каждого класса сигналы различались по частотно-временному масштабу, что достигалось изменением длительности одного меандра видеоимпульса ($\tau_1 = 92$ мкс, $\tau_2 = 260$ мкс, $\tau_3 = 560$ мкс). При этом огибающая спектра внутри класса имела одну форму, что являлось инвариантным признаком.

С целью поиска признаков в спектре сигнала, необходимых и достаточных для классификации дельфином данных сигналов, применялась полосовая фильтрация этих сигналов, которая искажала макроструктуру спектра в соответствующей частотной полосе, удаляя часть огибающей спектра и находящуюся под ней часть микроструктуры сигнала с дискретными компонентами спектра. При этом в полосе пропускания фильтра сохранялась внутренняя структура сигнала. Как видно из рисунка, фильтры поочередно перекрывали весь частотный диапазон сигнала. Эксперимент проводился по методике двигательного-пищевых условных рефлексов в морской бухте при последовательном предъявлении сигналов в свайно-сетевом вольере размером $10 \times 7 \times 6$ м. Излучатель – гидрофон (пьезокерамическая сфера $\varnothing 20$ мм) располагался на глубине 50 см. Звуковое давление составляло 80 дБ относительно 1 мкПа. Неравномерность частотной характеристики излучающего тракта не превышала 3 дБ.

Стартовая позиция дельфина находилась на расстоянии 6 м от излучателя. Последовательность сигнала транслировалась непрерывно в течение 1-5 секунд в зависимости от реакции дельфина. В случае правильного решения – распознавания сигнала положительного класса дельфин ударял рострумом по манипулятору, расположенному в 50 см перед излучателем и получал пищевое подкрепление. На предъявление сигналов отрицательных классов дельфин должен был оставаться на старте. Каждый из классов в процессе проведения экспериментов мог быть как положительным, так и отрицательным. При этом всегда один класс был положительным, а два других отрицательным. Для выработки прочного условного рефлекса на

положительный шумовой сигнал и его закрепления каждому животному предъявлялось по 100 стимулов в качестве положительного раздражителя. В экспериментах с шумовыми сигналами, подвергнутыми полосовой фильтрации, на каждую частотную полосу фильтра предъявлялось по 150 стимулов. Предварительно каждому животному предъявлялась программа обучения распознаванию шумовых сигналов, отличающихся временным кодом.

Анализ экспериментальных данных

Статистически обработанные результаты экспериментов в виде усредненных вероятностей различения дельфином классов предъявленных сигналов без фильтрации и при фильтрации даны на рис.2 и в таблице 1. Анализ экспериментальных данных показал (рис.2), что в каждой серии экспериментов обнаружена высокая вероятность распознавания классов предъявляемых шумов с применением различных полос фильтрации. Нарушение стабильности макроструктуры спектра (его огибающей) при сохранении

определенной части внутренней структуры в полосе пропускания не приводит к статистически значимому падению эффективности идентификации предъявляемых классов шумов. Можно предположить, что слуховая система дельфина, либо способна восстановить на основе имеющейся информации утраченные участки спектра, либо использует иные (временные, а не спектральные) механизмы работы при распознавании сложных акустических сигналов независимо от временных масштабов.

Еще в сороковых годах прошлого столетия была высказана гипотеза, согласно которой слуховую систему следует рассматривать не как чисто спектральный, а как спектрально-временной анализатор, в котором наряду с разложением в ряд Фурье осуществляется анализ временной формы возбуждающих колебаний.

Если рассматривать слуховой анализатор как набор фильтров, то при действии звука, состоящего из ряда гармоник, информация об этом звуке может быть представлена как распределение средних уровней выходных сигналов

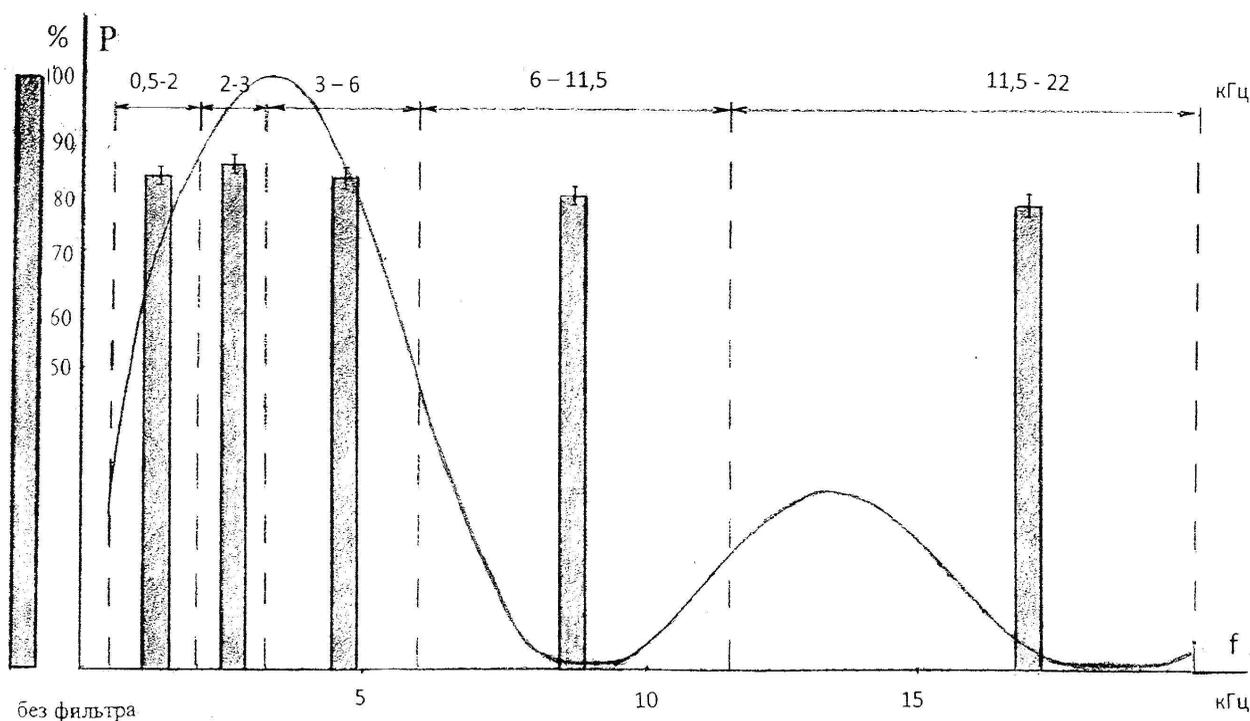


Рисунок 2 – Вероятность распознавания низкочастотного шума при полосовой фильтрации спектра (среднее \pm доверительный интервал 0.99)

Ордината – вероятности распознавания (%). Абсцисса – частоты низкочастотного шума. Сплошная линия – спектрально-энергетическая характеристика типичного низкочастотного шума. Штриховые вертикальные линии – частотные полосы фильтров. Вертикальные столбики – вероятности распознавания сигналов в соответствующих полосах фильтрации. Столбик слева – вероятность распознавания шума без фильтрации.

с каждого фильтра, и это распределение будет отражать спектральный состав звука – амплитуду и частоту членов ряда Фурье.

С другой стороны, можно анализировать мгновенные выходные сигналы каждого фильтра, которые изменяются во времени и форма волны которых отражает низкочастотные колебания огибающей спектра звука. Было проведено большое число работ, результаты которых дают серьезные основания считать представления о временном анализе колебаний правдоподобными. Нейрофизиологические наблюдения не противоречат этой гипотезе. Сохранение в картине нервной импульсации информации о периодичности стимулов легло в основу предположения о существовании системы измерения периодов (интервалов между нервными импульсами).

Анализ импульсной периодичности осуществляется с помощью нейронных линий

задержки в соединении со схемами совпадений, роль которых заключается в представлении периодического потока импульсов в виде функции автокорреляции. Наряду с автокорреляционным принципом анализа периодичности разрабатывались модели, использующие принцип фильтров совпадений. Как правило, во всех моделях предполагается, что нейронные структуры, ответственные за анализ периодичности, подключаются своими входами в определенных точках базилярной мембраны и основная обработка временной информации для данного звука осуществляется на пути, который связан с областью мембраны, имеющей максимальное смещение.

Проведенный эксперимент и анализ предметной области позволяют, в целом, придерживаться модели дельфина в виде некоторой гипотетической ГАС. Как будет показано ниже, эта модель по части решаемых задач соответствует реаль-

Таблица 1

Индивидуальные и средние вероятности распознавания дельфинами трёх типов шумов при полосовой фильтрации спектра

Полоса фильтра Гц	Сигнал	Вероятность распознавания			Среднее	Доверительный интервал 0.99
		Животные				
		1	2	3		
500-2000	A	0.85	0.81	0.83	0.83	± 0.02
	Б	0.80	0.80	0.80	0.80	± 0.02
	B	0.82	0.85	0.88	0.85	± 0.02
2000-3000	A	0.87	0.83	0.85	0.85	± 0.02
	Б	0.82	0.80	0.84	0.82	± 0.02
	B	0.87	0.87	0.90	0.88	± 0.02
3000-6000	A	0.80	0.80	0.80	0.88	± 0.02
	Б	0.83	0.82	0.84	0.83	± 0.02
	B	0.77	0.77	0.80	0.78	± 0.02
6000-11500	A	0.80	0.80	0.80	0.80	± 0.03
	Б	0.80	0.85	0.79	0.82	± 0.03
	B	0.77	0.77	0.79	0.78	± 0.03
11500-22000	A	0.82	0.78	0.80	0.80	± 0.03
	Б	0.80	0.78	0.84	0.81	± 0.03
	B	0.77	0.76	0.74	0.77	± 0.03

ным гидроакустическим средствам находящихся на вооружении ВМФ России. Это позволит, исходя из принципов построения моделей, использовать многие математические методы и модели, которые уже апробированы на реальных системах.

Модель дельфина в виде гидроакустической системы

Изучение биолокационной системы дельфина, как уже было сказано выше, представляет большой интерес, с точки зрения, возможности реализовать некоторые свойства этой системы в технические устройства. Поэтому моделирование дельфина как некоторой гидроакустической системы является полезным инструментом для изучения его биолокационных свойств. Известно [13,14], что тело дельфина содержит множество механорецепторов, которых, по-видимому, значительно больше, чем у человека. В процессе эволюции они превратились в многие тысячи гидрофонов, покрывающих все тело дельфина. В результате поверхность тела дельфина представляет собой чрезвычайно развитое многофункциональное антенное устройство, работающее в диапазоне частот от нескольких герц до 200 кГц при очень низком уровне собственных шумов и имеющее на выходе уникальное анализирующее устройство – мозг. На основе

вышесказанного рассмотрим общую схему гидроакустической системы дельфина, представленную на рис. 3 [13,14].

Первая подсистема – уши (1), дополняемые третьим приемным устройством – нижней челюстью. Она обеспечивает, в основном, прием коммуникационных сигналов, а также обеспечивает часть функций освещения подводной обстановки.

Вторая подсистема – изучающая все типы звуков в диапазоне 10 Гц – 196 кГц. *Зона ее излучения* (2).

Третья подсистема – система ближней гидролокации работает в зоне (3) и использует наиболее высокочастотные сигналы. Те же гидроакустические рецепторы, что с большой плотностью распределены на лицевой стороне, с меньшей плотностью расположены по поверхности всего тела дельфина и образуют *многоэлементную широкополосную гидроакустическую приемную антенну с круговой диаграммой направленности* (4).

Эта подсистема голографического приема обеспечивает освещение подводной обстановки, работая, как в активном, так и в пассивном режимах, а также дополняет работу первой подсистемы. Таким образом, дельфин обладает несколькими гидроакустическими информационными системами, частично перекрывающимися

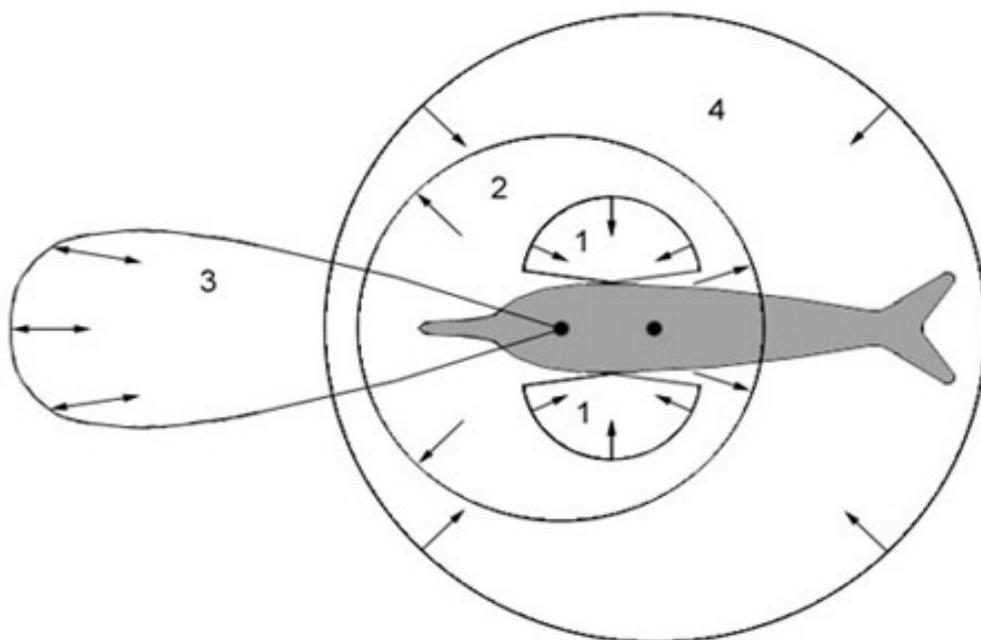


Рисунок 3 – Дельфин как приемно-излучающая гидроакустическая система

друг друга и, работающими параллельно. Разделение поступающей информации, и совместная ее обработка осуществляется с помощью мозга, в реальном масштабе времени.

Вышесказанное, обеспечивает существенное улучшение отношения сигнал/шум и соединение направленного приема, обеспечивающего высокое пространственное разрешение, с круговым обзором, который ведется как в активном, так и в пассивном режиме, что недоступно для технических средств.

Выводы

Исследования, результаты которых представлены в настоящей статье в целом подтверждают, предложенную гипотезу о наличии у дельфинов развитой системы пассивной локации. Необходимо отметить, что такое предположение, в принципе, должно иметь место, так как такая сложная биолокационная система, которой обладает дельфин, не может эффективно функционировать без учета меняющихся внешних условий. Эти условия в первую очередь формируются всем шумовым полем океана: шумы прибоя, жизнедеятельность морской фауны, волнение поверхности, шумы судоходства и т.д. Кроме того, выживаемость дельфина требует и соблюдения «режима тишины», он не должен демаскировать себя. Но при этом требуется знание обстановки, что необходимо приводит к наличию и пассивного режима (аналог режима шумопеленгования в гидроакустических станциях). Дельфин активно использует также коммуникационные сигналы (аналог режима связи), а также анализирует сигналы, полученные от других животных (аналог режима ОГС - обнаружение гидроакустических сигналов). Дельфины стайные животные, образующие семьи и не всегда дружелюбно относятся к особям даже своего вида, но из других семей. Из этого естественно возникает аналог режима опознавания «свой-чужой».

В заключение можно отметить, что из известных в настоящее время экспериментальных данных и их анализа, можно сделать вывод, что дельфины при обнаружении сложных акустических сигналов могут использовать различные принципы и механизмы обработки поступающей информации в зависимости от решаемой

задачи. Системное мировоззрение дает возможность представить дельфина в виде некоторой модели многофункциональной гидроакустической системы, которая по типу решаемых задач соответствует реальной ГАС, но при этом эффективность дельфина намного выше.

Список литературы

1. *Иванов М. П.* Эхолокационные сигналы дельфина при решении задач в сложных акустических условиях // *Акустический журнал*. – 2004. – Т.50. – № 4. – С. 550-561.
2. *Stefanov V. E., Ivanov M. P., Kashinov V. V., Stepanov B. G.* Mechanisms of interference resistance of the sonar system of dolphins exposed to man-made interference // *Symposium on Bio Sonar Systems and Bio-Acoustics, Institute Acoustics, Loughborough University, 2009.*
3. *Иванов М. П.* Эхолокационные сигналы дельфина (*Tursiops truncatus*) при обнаружении и распознавании подводных объектов. Диссертация. СПб.: СПбГУ, 2000. – 137 с.
4. *Иванов М. П.* Исследование акустического биосенсора дельфина и возможности построения его технического аналога // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. – 2011. – С. 108-121.
5. Язык зрение слух дельфинов. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://biofile.ru/bio/19123.html>
6. *Константинов А. И., Мовчан В. Н.* Звуки в жизни животных. – Л.: ЛГУ, 1985. – 304 с.
7. *Norris K. S.* Some problems of echolocation in Cetacea in *Marine bioacoustics* // Pergamon Press / Ed. by W.N. Tavolga. New York, 1964. P. 317-336.
8. *Айрапетьянц Э. Ш., Воронов В. А., Иваненко Ю. В., Иванов М. П., Ордовский Д. Л., Попов В. В., Сергеев Б. Ф., Чилингириц В. И.* К физиологии сонарной системы черноморских дельфинов // *Ж. эвол. биохим. и физиол.* – 1973. – Т. 9. – № 4. – С. 418-421.
9. *Сысуева Е. В.* Морфо-функциональная характеристика каналов звукопроводения у афалины и белухи // *Морские млекопитающие Голарктики*. – 2012. – Т. 2. – С. 278-282.
10. *Солнцева Г. Н.* К вопросу о звукопроводении у дельфинов // *Морские млекопитающие Голарктики*. – 2012. – Т. 2. – С. 254-260.

11. Зайцева К. А., Королёв 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.

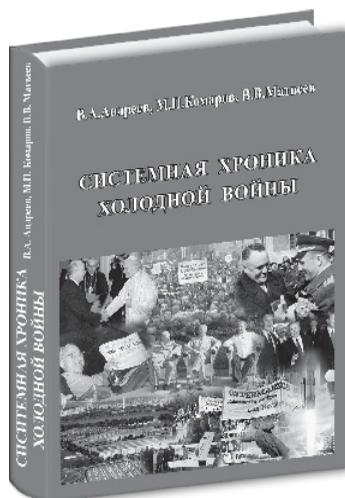
12. Зайцева К. А., Королев В. И., Ахи А. В., Кривченко А. И., Бутырский Е. Ю., Сапрыкин А. В. Эффективность обнаружения дельфином *Tursiops truncatus* низкочастотных шумов в условиях

частотной модуляции дискретных составляющих их спектров // Национальная безопасность и стратегическое планирование. – 2017. – №1 (17). – С. 43-53.

13. Гидроакустическая локация дельфинов. 2013. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.delphinidae.ru/publ/5-1-0-66>

14. Родионов А. А. Учиться у дельфинов // Наука в России. – 2007. – №2(158).

КНИЖНЫЕ НОВИНКИ



В. А. Андреев, М. П. Комаров, В. В. Матвеев. Системная хроника Холодной войны. – СПб.: «Стратегия будущего», 2013 – 489 с.

Историки многих стран мира пытаются объяснить и осознать Холодную войну как историческое явление. Для ее изучения создаются специальные научные организации и реализуются специальные проекты. Однако пока нет главного для многообразных и адекватных исторических исследований – систематизированной и достаточно полной хроники Холодной войны.

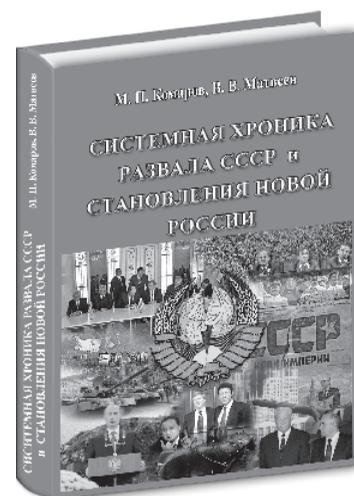
В настоящей работе впервые в систематизированном виде синхронизировано по времени, достаточно полно представлены исторические события и факты противоборства в годы Холодной войны в политической, идеологической, экономической, социальной и военной областях. Особое внимание уделено событиям противоборства в военной области: на суше, в воздухе, в космосе и в море.

Предназначена для всех тех, кто системно изучает международные отношения, а также интересуется историей второй половины XX века.

Комаров М. П., Матвеев В. В. Системная хроника развала СССР и становления новой России (1983-2014 гг.). – СПб.: «Стратегия будущего», 2017. – 423 с.: фото.

В книге в систематизированном виде представлена хроника событий разрушения мировой социалистической системы и её центрального элемента – Союза Советских Социалистических Республик; последующих, порой драматичных и даже трагичных, дезинтеграционных процессов на постсоветском пространстве, а также выхода на новую историческую траекторию развития России – одной из крупнейших стран исчезнувшей системы социализма. Достаточно полно и синхронизированно во времени приведены события в политической, экономической, социальной и военной сферах общественной жизни.

Предназначена для специалистов и всех тех, кто системно изучает историю развития крупных международных образований и государств, в том числе в критических точках бифуркации, когда возникает неопределённость: станет ли состояние системы хаотическим или она перейдёт на новый, более дифференцированный и высокий уровень упорядоченности.



По вопросам приобретения книг обращаться в редакцию журнала «Национальная безопасность и стратегическое планирование» (www.to-future.ru; e-mail: to-future@mail.ru; тел.: +7-911-7910880)