

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

ДЕЛЬФИН *TURSIOPS TRUNCATUS* И ЕГО ЛОКАЦИОННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ*

АННОТАЦИЯ

В статье рассматриваются локационные возможности сонара черноморского дельфина афалины, изученные исследователями к настоящему времени, и собственные экспериментальные данные, в которых обсуждается вопрос о механизмах различения целей и роли временной микроструктуры эхосигнала.

Ключевые слова: дельфин; локация; обнаружение; классификация; структура эхосигнала.

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

DOLPHIN *TURSIOPS TRUNCATUS* AND ITS RADAR CAPABILITIES

ABSTRACT

This article discusses the radar features Black Sea bottle-nosed dolphin sonar, researchers studied to date, and their own experimental data, which discusses mechanisms distinguish the purpose and role of an interim the microstructure of the ratio.

Keywords: dolphin; location; detection; classification; signal structure.

Введение

Освоение человеком Мирового океана трудно представить без развития таких наук как гидрогеология, гидробиология, гидрофизика и других. Особое место занимает гидроакустика, которая изучает особенности распространения, отражения, затухания звуковых волн в реальной водной среде для целей освещения как надводной, так и подводной обстановки. При этом решаются задачи активной и пассивной локации, классификации и распознавания, связи, поиска затонувших объектов и т. д. При проектировании гидроакустических средств конструкторы стремятся учитывать опыт живой природы и, в частности, локационную систему дельфинов. Изучение особенностей локационной системы дельфинов требует решения широкого круга задач, а именно, механизмов формирования и структур излучаемых сигналов, их адаптацию к изменяющимся свойствам среды и помехо-сигнальной обстановки, способность к восприятию большого разнообразия сигналов и распознаванию предметов, имеющих различные свойства и структуру.

В 1947 году А. Мак-Брайд впервые сообщает о наличии эхолокации у дельфинов. Экспериментальные доказательства эхолокационных способностей китообразных были получены позднее. Записи акустических сигналов были сделаны впервые Ф. Вудом в 1951 году. Многочисленные работы, проведенные после него, позволили обнаружить большое разнообразие звуков, издаваемых дельфинами под водой.

Однако труднодоступность морских млекопитающих для проведения прямых исследований в океане, недостаточная техническая оснащённость на первых этапах, равно как и промысловое направление работ, были главными сдерживающими факторами интенсивного развития дальнейших научных исследований. Примерно с пятидесятих годов китообразные, в частности дельфины, заинтересовали исследователей различных специальностей под новым углом зрения. Эти исследования стимулировались необходимостью выяснения тех приспособительных особенностей китообразных, которые позволили им перейти к постоянному

* Работа выполнена в Институте эволюционной физиологии и биохимии им. И.М. Сеченова РАН с использованием средств государственного бюджета на 2018 год. № ААА-А18-118013090245-6

существованию в водной среде: быстро плавать, нырять на одном вдохе на десятки и сотни метров в глубину, ориентироваться там, находить пищу, избегать препятствия и т. д.

В эволюции у морских млекопитающих формируется специфическая, узкоспециализированная, высокоадаптивная функция эхолокации. Развиваясь в эволюционном плане как идиоадаптация, своеобразно частное приспособление в системе анализаторов, эхолокация под влиянием длительных экологических факторов или их экстренной смены приводит к реконструкции в системе межанализаторных отношений, когда происходит замещение одних функций и усиленное развитие других. Особую значимость приобретает эхолокация у дельфинов, поскольку они являются вторичноводными животными, перешедшими к водному образу жизни, обладая вполне сформировавшейся слуховой системой наземных млекопитающих, которая в водной среде претерпела существенные преобразования. Звук в водной среде является главным источником информации, поэтому слух становится ведущим сенсорным каналом. История становления эхолокации у дельфинов полностью укладывается в модель последовательного замещения зрения и развивалась поэтапно: усиление функций приёмного, рецепторного звукового аппарата, расширение частотного диапазона в область ультразвука, возможного улавливания высокочастотных звучаний (жертвы или агрессора). Сама эхолокация возникает, когда к аппарату восприятия ультразвука добавляется ультразвуковая излучающая система с запуском зондирующих дискретных импульсов. Локационное зондирование среды дельфины осуществляют, излучая короткие широкополосные импульсные сигналы, представляющие собой один-полтора периода волны сжатия-растяжения длительностью 10-100 мкс в широком диапазоне частот.

В 1962-1965 годах в науке сложилась ситуация, когда учёные разных стран обратили внимание на возможности прикладного использования принципов и механизмов работы сонара китообразных. На основании Постановления Совета Министров СССР в 1965 г. в районе г. Севастополя был создан Государственный Океанариум как научно-техническая база ВМФ. На базе Океанариума работали более 50 организаций: научно-исследовательских

институтов, высших учебных заведений, конструкторских бюро. В отделе биоакустики исследовались локационные возможности дельфинов с целью совершенствования гидроакустических систем связи. Большой вклад в изучение этой проблемы внесли Институт эволюционной физиологии и биохимии им. И.М. Сеченова АН СССР, Институт эволюционной морфологии и экологии им. А.Н. Северцова АН СССР, Акустический институт им. Н.Н. Андреева АН СССР, Ленинградский государственный университет, Ленинградский институт авиационного приборостроения и другие организации.

Гидролокатор дельфина

Анатомические и акустические исследования показали, что издаваемые дельфинами звуки генерируются в области лобно-жирового выступа (мелона) и верхней челюсти. В продуцировании звуков участвуют пары носовых мускульных пробок, частично закрывающих носовой проход. Пары воздушных мешков, связанных с этими носовыми пробками, являются рефлекторами для формирования направленности продуцируемого звука и резервуарами для воздуха, используемого для генерации звука. Первая пара воздушных мешков – дорзальные – отделяется сразу же от носового прохода, который идёт от наружного дыхательного отверстия-клапана (дыхала). Вторая пара мешков – премаксиллярные – отходит от средней части носового прохода, третья – назофронтальные – отделяется от носового прохода в месте его деления на два костных канала. Характерной чертой строения воздухоносных путей дельфинов является их деление на ряд участков, в которых давление воздуха различно: 1. носовой проход с системой воздушных мешков. 2. полость костных носовых проходов с небольшой хоанной полостью, отделённая от первого участка клапаном, который располагается между премаксиллярным и назофронтальным мешками. 3. полость гортани, трахеи и крупных бронхов вплоть до системы сфинктеров бронхов. Хотя до последнего времени механизм генерации звуков остаётся недостаточно ясным, решение этого вопроса, тем не менее, тесно связано с временным и произвольным разделением воздушных потоков дыхательного тракта, разделённых на ряд участков. Перепад давления воздуха после акта вдох-выдох

между первым, вторым и третьим участками будет реально иметь место, что создает предпосылки для формирования нужного давления, изменение которого дает возможность формирования большого разнообразия параметров звуков.

Все предполагаемые в настоящее время схемы генерации звуков представляют собой достаточно сложный механизм с точной регулировкой всех фаз его деятельности. На рис.1 приведена схема гидролокатора дельфина.

Сигнал формируется в мелоне (акустической линзе) – он фокусирует звуковые колебания и согласовывает соответствующие характеристики антенны и воды. Анатомически лобно-жировой выступ расположен перед назально-фронтальными воздушными мешками. Звук, генерируемый парой пробок, передаётся в мелон и после формирования в нем, передаётся в воду. В лаборатории Института физиологии им. А.А. Ухтомского при СПбГУ были измерены характеристики этой линзы. Было показано, что её параметры плавно меняются от центра к периферии, а на процесс формирования акустического поля влияют также и температурные градиенты и предположено, что воздушные мешки, помимо генерации ультразвуковых колебаний, могут изменять геометрические размеры мелона, варьируя при этом шириной поля излучения.

Изучением и моделированием принципа действия сонара дельфина занимались многие исследователи. Его принципиальная схема состоит из

генератора коротких импульсов (пневмопушки), рефлектора и рефрактора. Принцип действия акустической пушки был смоделирован в Акустическом институте [1]. В других исследованиях были предложены различные модели формирования акустического поля локатора – от моделей логарифмических антенн до математических с суперпозицией излучённых и отражённых импульсов.

В настоящее время отсутствует гипотеза, которая бы непротиворечиво объединяла и объясняла опытные факты по вопросу генерации и формирования эхолокационного сигнала. Однако увеличение числа исследований по данной проблеме позволяет надеяться на появление обобщающей гипотезы в ближайшее время.

Эхолокационные сигналы дельфина

Зондирующими сигналами, по установившейся терминологии, называется последовательность импульсов, излучаемых дельфинами для решения определённой эхолокационной задачи, а зондирующим импульсом – одиночный импульс из последовательности импульсов, составляющих эхолокационный сигнал. Импульс имеет сложную структуру и состоит из ряда компонент. Зондирующим является только импульс, зарегистрированный в дальнем поле, т. е. на расстояниях, для которых убывание амплитуды импульса происходит по сферическому закону. Длительность зондирующего сигнала может существенно меняться

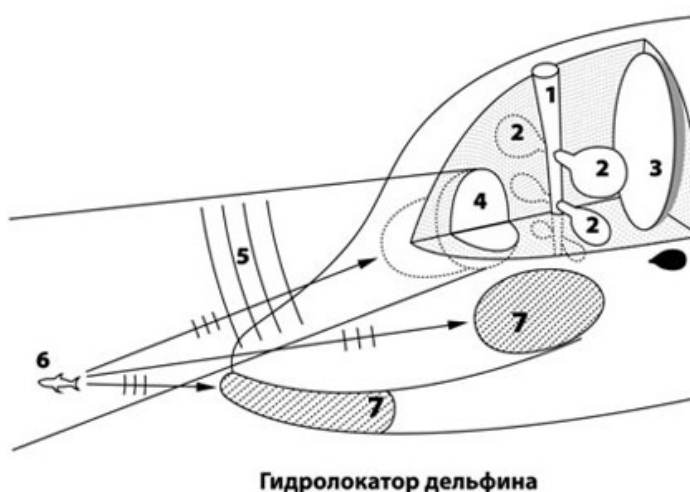


Рисунок 1 – Схема гидролокатора дельфина

1 – носовой канал, 2 – воздушные мешки, 3 – рефлектор, 4 – акустическая линза, 5 – ультразвуковой луч, 6 – лоцируемый объект, 7 – приемная антенна

в зависимости от дальности объекта локации, его отражательной способности и других факторов в пределах от долей секунды, когда сигнал состоит из 2-3 импульсов, до минуты и более, когда излучается множество импульсов, составляющих группы импульсов – пачки. Дельфин излучает каждый последующий импульс после принятия эха от предыдущего, т. е. интервал между импульсами T должен удовлетворять условию: $T > \frac{2l}{c}$, где l – расстояние до объекта, c – скорость звука в воде. Животное может увеличивать частоту следования зондирующих импульсов по мере приближения к объекту, но делает это не всегда. При локации, брошенной в воду рыбы, наблюдается закономерное увеличение частоты следования импульсов, а при решении задач обнаружения и различения закономерного увеличения частоты следования не наблюдается вплоть до момента принятия решения.

Эхолокационные сигналы подробнее всего изучены на афалинах. Получены основные спектральные характеристики эхолокационных импульсов: положение максимума спектра, ширина полосы частот, пространственно-временная структура, оценены разрешающие способности эхолокационного аппарата. Дельфин излучает сигналы и воспринимает их в огромной полосе частот – от 20 до 200000 Гц (для сравнения: возможности человеческого слуха – 20-20000 Гц). Появление в 70-х годах XX века аппаратуры, записывающей их сигналы без искажений, показало, что дельфины используют широкополосные сигналы, структура которых значительно сложнее, чем узкополосных. Математические модели широкополосных сигналов требуют использования более изощрённой математики, а именно, методов функционального анализа, расширения понятия акустического сигнала и введения представлений сигнала, согласованных с преобразованиями носителя сигнала. Большой вклад в этом направлении был сделан В.А. Сапрыкиным и его научной школой [2], теоретической базой которой является теоретико-групповой подход в теории сигналов, позволяющий создать адекватные модели сложных широкополосных сигналов, преобразованных средой и кинематикой движущихся объектов локации. Для широкополосных сигналов понятие фаза, амплитуда, частота являются время-зависимыми, т. е. являются функциями, а не числами, как у тональных сигналов. Эффект Доплера

рассматривается не просто как сдвиг по частоте, а как аффинное преобразование времени, а для быстро движущихся объектов как дробно-линейное. Сложные широкополосные сигналы обладают хорошими разрешающими способностями, как по частоте, так и по времени. Используемые дельфином сигналы являются модулированными, причём модуляция осуществляется и по амплитуде, и по фазе, и по частоте. С развитием радиотехнических и гидроакустических систем было замечено: чем шире частотная полоса сигнала, тем выше помехоустойчивость связи. При такой модуляции частота меняется во времени. В сигнале, который излучает дельфин, присутствуют все частоты одновременно, т. е. сигнал широкополосный и сосредоточен во времени.

При формировании акустического импульса в пространстве выделяется период его нарастания (увеличения по амплитуде), потом следует установившийся колебательный процесс (несущая частота не меняется), а в дальнейшем сигнал убывает. Чем уже полоса пропускания передающей антенны, тем длиннее периоды нарастания и убывания, тем длиннее и устойчивее колебательный процесс, характеризующийся несущей частотой. Такого установившегося процесса в импульсах дельфина просто нет. Можно сказать, что он использует сигналы с нулевой несущей. Система тем устойчивее к разного рода помехам, чем больше модуляций она использует. А дельфины применяют такое их количество, что сосчитать и исследовать пока никому не удалось.

Полученные в опытах сигналы животных напоминали одиночную волну с полуволной сжатия и разряжения. Спектральная же характеристика импульса по акустической оси не имеет определённого максимума, но зависит от азимута. Первые экспериментальные данные показали: пространственная характеристика звукового поля дельфинов близка к предсказанной для широкополосных сигналов – отсутствуют боковые составляющие поля излучения, что уменьшает неоднозначность определения цели по угловым координатам. При усложнении задачи или ухудшении соотношения сигнал/помеха животные резко усиливают сигналы. С точки зрения теории сигналов они используют при этом интегрально-временное кодирование.

Возможности гидролокатора дельфина

Использование гидролокатором дельфина широкополосных сигналов открывает перед ним большие возможности акустического обзора как при активной [1], так и при пассивной локации [3-9]. Как показали многочисленные исследования отечественных и иностранных авторов, эхолот дельфина является весьма эффективным инструментом активного анализа внешней среды. Он позволяет животному решать разнообразные задачи: обнаруживать подводные объекты на расстоянии до 600 м за счёт перехода от моноимпульсного к мультиимпульсному режиму локации, обнаруживать подводные объекты, размер которых может быть в несколько раз меньше длины волны, соответствующей максимуму спектра зондирующего сигнала, различать и узнавать объекты, отличающиеся по размеру всего на 2%, дифференцировать цели по материалу, форме, взаимному расположению элементов сложной мишени (при различиях в местоположениях, соответствующих задержкам в 2-5 мкс), пеленговать звучащие источники с ошибкой до одного градуса даже при наличии помех, превосходящих сигнал на четыре порядка по мощности и расположенные на угловом расстоянии в один градус. Столь высокая эффективность работы локационной системы дельфина достигается за счёт использования адаптивных механизмов как излучения, так и приёма звука: целесообразное изменение мощности излучения, спектра локационного импульса, частоты следования импульсов и траектории движения.

Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что локатор дельфина может служить полезным живым прототипом технических сенсорных систем, которые потребуются человеку при широком освоении Мирового океана.

До настоящего времени целая группа важных вопросов исследования и моделирования эхолота дельфина осталась малоисследованной – детальное изучение ближнего эхолокационного поля, механизмы проведения звука к улитке, нейрофизиологические механизмы звукового анализа и ряд других. И, тем не менее, имеющийся экспериментальный материал позволяет выделить ряд направлений исследований, представляющих наибольший бионический интерес:

- исследование механизмов эхолокационного различения объектов,
- исследование адаптивных особенностей эхолокационного анализа,
- решение вопроса о подстройке тонкой структуры излучаемого сигнала,
- возможности адаптивных изменений диаграммы направленности по излучению,
- механизмы излучения зондирующих импульсов, позволяющих получать короткие по времени, мощные и направленные в обеих плоскостях сигналы,
- механизмы слухового анализа эхолокационных импульсов.

Настоящая работа в её экспериментальной части посвящена исследованию первого из перечисленных выше направлений, а именно механизмов эхолокационного различения объектов.

После обнаружения дельфином объекта локации перед животным стоит задача распознавания его основных параметров, а именно формы, размера, материала. Хотя к настоящему времени известно, что ряд видов дельфинов [10-17] обладает способностью к тонкому различению параметров и свойств предметов локации, однако наиболее изучены разрешающие возможности афалины [14,15]. Тщательные экспериментальные исследования показали, что признаками различения мишеней могут быть 1) величина интенсивности отраженного сигнала, 2) изменение фазовых составляющих компонент сигнала, 3) разница в характеристиках направленности излучения и приема, 4) соотношение интервалов времени между первичным и вторичным эхо, 5) особенности спектральной структуры сигнала, 6) положение максимума в спектре сигнала и средняя величина периода осцилляций в спектре.

В 1975 г. Н.А.Дубровским была сформулирована гипотеза [14] о механизмах, лежащих в основе различения дельфинами объектов локации, отличающихся между собой по размеру и материалу. Суть гипотезы заключается в том, что различение объектов возможно в том случае, когда в слуховой системе животного происходит анализ спектра эха, в котором содержится информация о собственных колебаниях объекта локации, вызванных лоцирующим сигналом. Не разница волновых сопровитвлений сравниваемых материалов, а разница

скоростей сдвиговых волн определяет эффективность распознавания. Спектры одинаковых по размеру объектов имеют средние периоды осцилляций, величина которых зависит от способности мишеней рассеивать локационный сигнал. При этом надежность различения зависит от разницы средних периодов осцилляций и не зависит от их абсолютной величины [14, 15]. В работах [11, 20, 21], в которых использовался смоделированный импульс, имитирующий локационный сигнал дельфина, были получены результаты, которые подтвердили эти выводы. Однако гипотеза, высказанная Н.А.Дубровским, имеет определенные ограничения ее применения из-за функциональных особенностей слуховой системы дельфина. Чувствительность слуха дельфина к изрезанности спектра эхосигнала ограничена числом периодов осцилляций. Один период и более ста не могут быть обработаны слуховой системой животного. Более того, дальнейшие исследования автора гипотезы показали, что животные могут находить дополнительные признаки в сигнале. К настоящему времени становится очевидно, что единый механизм работы локатора дельфина при различении им свойств объектов не установлен.

В данной работе была предпринята попытка выяснить специфику отраженного сигнала при решении животным достаточно сложных акустических задач локационного распознавания свойств объектов с применением нового методического приема, а именно, когда объектом различения становится не один объект локации, а целый класс объектов, объединенных по определенному признаку [22]. В наших опытах использовались мишени (шары), различного диаметра – 11, 16, 21, 30 мм, изготовленные из различных материалов – стали, латуни и эбонита. В экспериментах участвовали три дельфина афалины, ранее обученные акустическим экспериментам. Эксперимент проходил в сетевом вольере открытой бухты моря по двигательной методике с пищевым подкреплением. Методика проведения эксперимента была такова: предварительно животное обучалось с целью формирования у него понятия класса объектов локации. Для каждого животного понятие класса определялось материалом: либо сталь, либо латунь, либо эбонит. Опыты проводились таким образом, что положительным для животного был всегда один класс материалов, а

два других были отрицательными. Для того, чтобы установить те информационные признаки в отраженном сигнале, на которые опирается слуховая система дельфина, сравнивали результаты поведенческих реакций животных с данными по аттестации объектов локации импульсами, имитирующими сигналы дельфина, которые могли служить информационными признаками при формировании понятия «класс» [11, 20]. Обработка спектров эхосигналов показала их большую вариабельность по форме огибающей, по степени изрезанности, количеству энергетических максимумов, выраженности осцилляций. Оказалось, что особенность спектральной структуры отраженного сигнала не влияет на вероятность правильного распознавания мишеней. Полученные результаты свидетельствуют о том, что высокая вероятность обнаруживается тогда, когда спектры сигналов были сходными, а при различных спектрах вероятность была низкой, что противоречит имеющимся в настоящее время данным о значимости спектральных характеристик отраженного сигнала (Рис. 2, 3) [11, 14, 15].

Известно, что отраженный от объекта локации сигнал состоит из первичной компоненты, которая является отражением от поверхности мишени и по форме идентично зондирующему импульсу, и вторичной компоненты, задержанной относительно первичного эха на определенное время. Расчеты показали, что эффективность распознавания мишеней в условно-рефлекторных опытах не зависит от временных соотношений между компонентами эхосигнала, что противоречит тем исследованиям, утверждающим, что величина временного интервала между первичным и вторичным эхо (Рис. 4) является признаком распознавания мишеней.

Анализ временных микроинтервалов в первичном и вторичном эхо показывает, что при высокой степени относительного различия, дельфин эффективно идентифицирует мишени (Рис.5).

Корреляционный анализ показал, что степень корреляции между временной структурой вторичного эха и эффективностью работы сонара в поведенческих опытах довольно высока. Корреляция в первичном эхо не обнаружена.

Таким образом, выявлена значимость временной компоненты эхосигнала при решении животным задач классификации объектов, что ранее

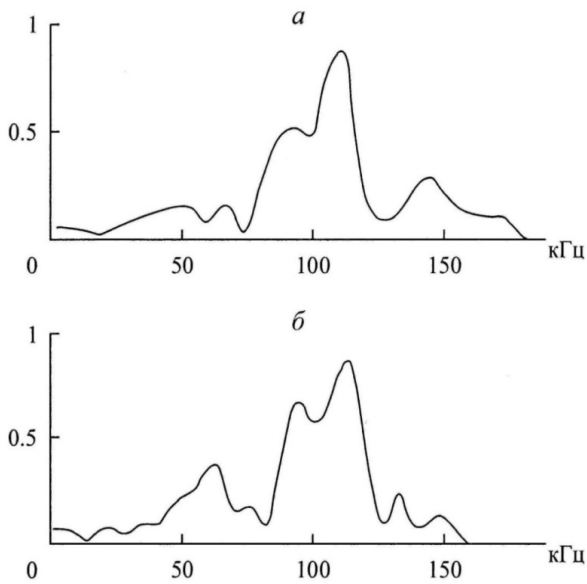


Рисунок 2 – Энергетические спектры от мишеней.

а – стальной шар диаметром 30 мм,
 б – эбонитовый шар диаметром 30 мм.
 По оси абсцисс – частота (кГц),
 по оси ординат – амплитуда огибающей спектра

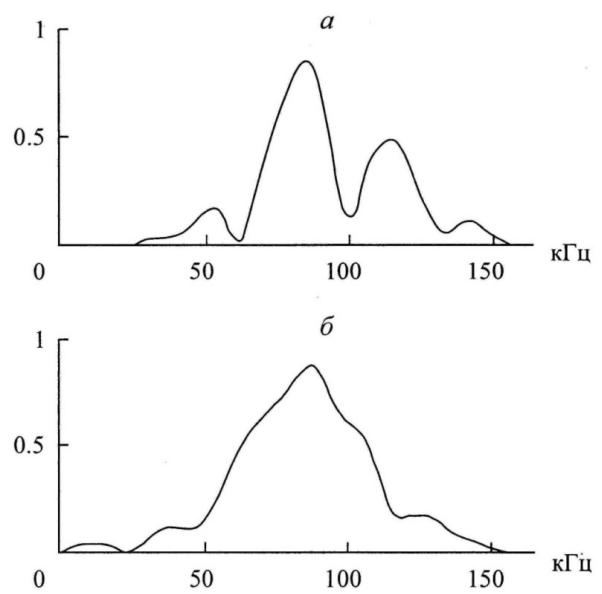


Рисунок 3 – Энергетические спектры от мишеней.

а – стальной шар диаметром 16 мм,
 б – латунный шар диаметром 21 мм.
 По оси абсцисс – частота (кГц),
 по оси ординат – амплитуда огибающей спектра

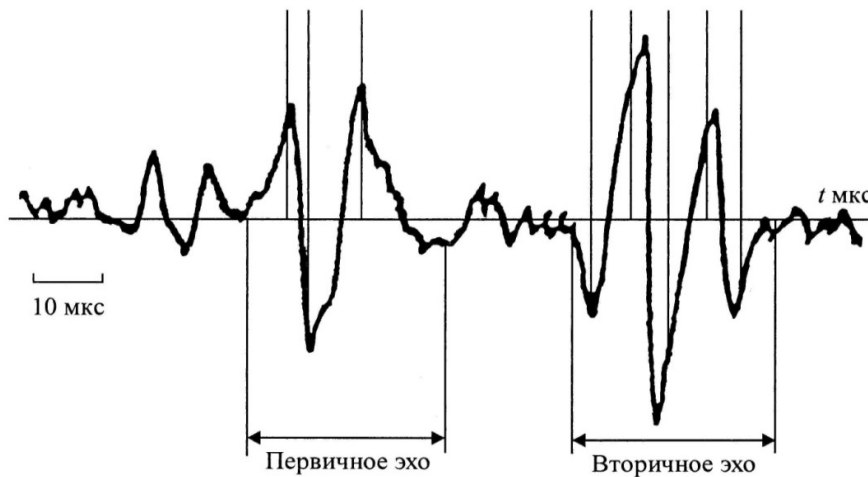


Рисунок 4 – Временная микроструктура эхосигнала от аттестуемой мишени

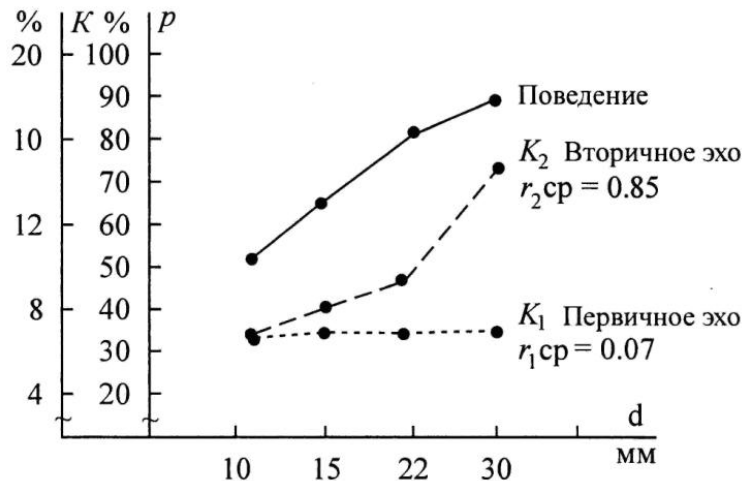


Рисунок 5 – Усреднённые результаты поведенческих опытов и данные обработки микроинтервалов времени в первичном и вторичном эхе от аттестованных мишеней

было не известным механизмом в работе локатора дельфина при решении им задач распознавания объектов по размеру и материалу, что свидетельствует о том, что сонар дельфина использует различные механизмы обработки акустической информации.

На рис.5 введены следующие обозначения. По оси ординат: K – коэффициент степени относительного различия мишеней (%), p – вероятность различия мишеней в поведенческих опытах (%). По оси абсцисс – диаметр мишеней (d , мм), K_1 – коэффициент различения мишеней по временным интервалам первичного эха, K_2 – для вторичного эха, r_{1cp} – степень корреляции временных интервалов первичного эха с эффективностью распознавания мишеней в поведенческих опытах, r_{2cp} – то же для вторичного эха.

Исследования локационного аппарата дельфина, начались в конце 50-х – начале 60-х годов прошлого столетия, когда были проведены первые опыты для доказательства самого факта существования эхолокационного феномена. Дальнейшие исследования существенно расширили наши сведения о сонаре дельфина. Наиболее точные и качественные работы относятся к самому последнему времени, когда была создана адекватная аппаратура для приёма, усиления, регистрации и обработки локационных сигналов, и были разработаны методические приёмы исследований.

Хотя к настоящему времени, благодаря многолетним и многочисленным работам в лабораториях ряда стран мира накоплен большой экспериментальный материал, надо все-таки признать, что современных знаний об эхолокации морских млекопитающих недостаточно, в первую очередь мало изучены её биологические основы.

Встаёт закономерный вопрос: какова же перспектива изучения эхолокации у морских млекопитающих? Открытие акустического способа ориентации у дельфинов не явилось принципиально новым с точки зрения технического прогресса. К тому времени человек уже имел ряд приборов – эхолот, гидролокатор, радиолокатор, работающие по аналогичному принципу. Возможно даже, что открытие эхолокации произошло именно потому, что сознание исследователей было уже подготовлено предшествующими техническими достижениями. Тем не менее, интерес со стороны

физиков и инженеров к «живым локаторам» сохраняется. Что же можно получить в результате расшифровки конструкций биологической модели эхолокации? Следует отметить, что междусонарами животных и техническими радио и гидролокационными системами, созданными человеком, существует принципиальное сходство: излучение квантов энергии, определение по эху наличия объекта и расстояния до него, использование высоких частот и коротких сигналов. Сравнение дальности действия этих систем будет не в пользу природы, однако, по многим другим показателям «живые локаторы» вызывают зависть инженеров – сверхминиатюрностью конструкций с высокой разрешающей способностью и помехоустойчивостью.

До настоящего времени сохраняется значительный интерес специалистов, занимающихся решением технических проблем к тому, каким образом они решены в живой природе. В процессе биологической эволюции живые организмы, приспосабливаясь к окружающей среде в интересах выживания данного биологического вида, смогли более или менее оптимально, в техническом смысле, разрешить проблемы, аналогичные стоящим теперь перед инженерами. Подход к изучению живых организмов с позиций техники оказался полезным, поскольку он стимулирует как биологические исследования, так и техническую мысль.

Список литературы

1. Дубровский Н. А. Проблемы исследования и моделирования эхолокатора у дельфина. // Докл. IV Всес. конф. по бионике. – М. 1973. – Т. 1. – С. 7–13.
2. Бутырский Е. Ю., Васильев В. В., Сапрыкин А. В., Обухов Е. В. К вопросу об обработке гидроакустического сигнала // Сборник Актуальные проблемы военной науки и политехнического образования ВМФ. – СПб. 2016. – С. 173.
3. Зайцева К. А., Королев В. И., Ахи А. В. Распознавание дельфинами *Tursiops truncatus* классов шумоподобных сигналов // Жур. эвол. биох. и физиол. – 2008. – Т. 44. – № 2. – С. 194–199.
4. Зайцева К. А., Королев В. И., Ахи А. В. Устойчивость пассивного слуха дельфина (*T. truncatus*) к деформации спектра низкочастотного сигнала // Жур. эвол. биох. и физиол. – 2012. – Т. 48. – № 6. – С. 573–578.

5. Зайцева К. А., Королев В. И., Ахи А. В. Чувствительность слуха дельфина *Tursiops truncatus* к полосе фильтрации спектра низкочастотного шума // Жур. эвол. биох. и физиол. – 2015. – Т. 51. – № 2. С. 130–136.
6. 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.
7. Зайцева К. А., Королев В. И., Ахи А. В., Кривченко А. И., Бутырский Е. Ю. Восприятие дельфином *Tursiops truncatus* с нестабильной во времени частотной модуляцией их тональных компонент // Жур. эвол. биох. и физиол. – 2017. – Т. 53. – № 3. – С. 215–217.
8. 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.
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. – № 2-1(18). – С. 63–73.
10. Айрапетьянц Э. Ш., Константинов А. И. Эхолокация и природе. – Л., 1974.
11. Голубков А. Г. Гидролокатор дельфина. – Л., 1977.
12. Соколов В. А., Романенко Е. В. Черноморская афалина (*Tursiops truncatus*). Морфология, физиология, акустика, гидродинамика. – М., 1997.
13. Au W.W.L. The sonar of dolphins. – New-York, 1993.
14. Дубровский Н. А. Эхолокация у дельфинов. – Л., 1975.
15. Дубровский Н. А. Эхолокационный анализатор черноморской афалины. – М., 1997.
16. Au W.W.L., Schusterman R. J., Kursting D.A. Sphercylinder discrimination via echolocation by *Tursiops truncatus* // Animal sonar system. – 1980. – P. 859–862.
17. Nachtigall P. E., Moor P. W. Odontocete echolocation performance on object size, shape and material // Animal sonar, processes and performances // Life sciences. – 1988. – V. 156. – P. 862–872.
18. Au W.W.L., Snyder K. J. Long-rang target detection in open waters by an echolocation Atlantic Bottlenose Dolpin (*Tursiops truncatus*) // J. Acoust. Soc. Amer. – 1980. – V. 68. – N 4. – P. 1077–1084.
19. Hickling R. Analysis of echoes from a solid elastic sphere in water // J. Acoust. Soc. Amer. – 1962. – V. 34. – P. 1582–1592.
20. Вальдман Д. Г., Макаров С. Б., Теаро В. И. Синтез спектрально-эффективных сигналов с заданными частотно-временными параметрами для систем связи // Техника радиосвязи. – 1997. – В.3. – С. 75–77.
21. Лифшиц М. С. Корреляционная модель опознавания объектов эхолокационными животными // Биофизика. – 1975. – Т. XX. – В. 5. – С. 920–924.
22. Сапрыкин В. А., Королев В. И., Дмитриева Е. С., Феденко М. С., Борисова Е. Д. Инвариантность распознавания дельфином раздражителей // Физиологический ж-л ССР. – 1977. – Т. LXIII. – С. 1083–1087.

Статья поступила в редакцию 29 сентября 2017 г.