

## МОРСКИЕ МЛЕКОПИТАЮЩИЕ И ПАРАДИГМА ЩЕЛЧОК–ЭХО–ЩЕЛЧОК

*Карпиченко Станислав Евгеньевич*<sup>1</sup><sup>1</sup> Государственный научно-исследовательский институт прикладных проблем, Санкт-Петербург, Россия

## АННОТАЦИЯ

В статье проанализированы научные публикации по эхолокации обученных морских млекопитающих, которые содержат результаты исследований для доказательства или проверки существующей парадигмы эхолокации “Щелчок-эхо-щелчок”. В результате проведенного анализа установлено, что только 90% измеренных интервалов между пакетами импульсов превышают время прохождения пакета до мишени и обратно. Это требовало объяснения и выдвижения новых гипотез. Предложена гипотеза “озвучивания” мишеней морскими млекопитающими. Варианты озвучивания: щелчок-отклики, щелчок-от(-щелчок-)клики, щелчки-отклик. Есть основания считать, что данный режим локации используют некоторые виды зубатых китов: косатки, дельфины и белухи.

В случае подтверждения гипотезы озвучивания при проведении новых экспериментов использование данного режима работы биолокаторов морских млекопитающих при построении их технического аналога могло бы значительно увеличить поисковую производительность перспективных гидроакустических станций. Требуется проведение дополнительных исследований по проверке предположения об отсутствии эхосигналов от мишеней при работе биолокатора в режиме озвучивания.

**Ключевые слова:** морские млекопитающие, зубатый кит, эхолокация, межимпульсный интервал, интервал между пакетами импульсов, частота следования импульсов.

## MARINE MAMMALS AND CLICK–ECHO–CLICK PARADIGM

*Karpichenko S. E.*<sup>1</sup><sup>1</sup> State Research Institute of Applied Problems, St. Petersburg, Russia

## ABSTRACT

Scientific publications on echolocation of trained marine mammals that contain the results of researches for proving or checking of existing click-echo-click echolocation paradigm are analyzed in this article. As a result of the analysis it is established out that only 90% of the measured intervals between packages of impulses exceed time of passing of a package to a target and back. It demanded an explanation and promotion of new hypotheses. Hypothesis of “forcing” the targets to vibration by marine mammals is proposed. Variants of forcing to vibration: click-responses, click-res(-click-)ponses, clicks-response. There are reasons to believe what this mode of echolocation use some species of toothed whales: killer whales, dolphins and white whales.

In case of confirmation of a hypothesis of forcing to vibration during carrying out new experiments the using this operating mode of biolocators of marine mammals at creation of their technical analog can increase considerably the search productivity of hydroacoustic stations. Carrying out additional researches on verification of the assumption of lack of echo signals from targets during the work of a biolocator in operating mode of forcing to vibration is required.

**Keywords:** marine mammals, toothed whale, echolocation, interclick interval, interpacket interval, pulses repetition rate.

**Введение**

В течение 60-ти лет учёные смежных научных специальностей, в том числе специалисты Военно-морского флота, пытаются раскрыть тайну биолокаторов зубатых китов с целью построения их технического аналога.

Изначально исследователями высказывалось предположение, что биолокаторы морских млекопитающих работают так же, как и гидролокационные станции: щелчок–эхо–щелчок, например [1, 2]. В то же время известно, что дельфины превосходят технические средства обнаружения при работе на мелководье, в условиях сильной реверберации, а также при поиске подводных объектов

под слоем грунта. Морские животные демонстрируют поисковую производительность, которую не могут обеспечить существующие гидролокационные станции.

Это позволяет предположить, что у морских млекопитающих есть ещё один режим работы биолокатора, приобретённый ими в результате эволюционного развития для поиска пищи.

Пока тайна этого режима работы биолокатора не раскрыта, учёные продолжают придерживаться существующей эхолокационной парадигмы и объяснять неудовлетворяющее этой парадигме эхолокационное поведение дельфинов с помощью различных гипотез.

В тех случаях, когда межимпульсный интервал внутри пакетов (серии) меньше времени прохождения импульсов до мишени и обратно, исследователи полагают, что морское животное накапливает энергию нескольких эхоимпульсов в приёмном тракте своего биолокатора и за счёт этого увеличивает отношение сигнал/помеха [2, 3, с. 438].

В существующих локационных приборах накопление последовательных эхосигналов осуществляется как с временным стробированием, так и без него. Известно, что эхосигнал составляет 0.001-ю долю межимпульсного интервала дельфинов, и "... следует признать, что любое накопление последовательных эхосигналов, будь то когерентное или некогерентное, невозможно без временного стробирования. ... Физиологические доказательства существования эффекта стробирования у дельфинов пока отсутствуют" [3, с. 439].

Позднее было предложено считать пачку импульсов как отдельный сигнал, характеризующийся следующими параметрами: амплитудой, длительностью, количеством импульсов и изменением интервала между импульсами. Интервал между пачками импульсов больше, чем время прохождения пачки до цели и обратно [4]. Это позволило объяснить результаты измерений временных интервалов между пакетами импульсов в большинстве экспериментов [5, 6].

В данной статье проведён анализ научных публикаций по эхолокации обученных морских млекопитающих, в которых при постановке различных экспериментов исследователями доказывалась или проверялась парадигма щелчок-эхо-щелчок.

Целью работы является выдвижение гипотезы, объясняющей обнаруженные факты несоответствия межимпульсных интервалов зондирующих импульсов обученных морских млекопитающих эхолокационной парадигме.

### Анализ научных публикаций по эхолокации морских млекопитающих и парадигме щелчок-эхо-щелчок

В работе [1] отмечено, что "общей закономерностью для всех кривых явилось повышение частоты следования к моменту захвата рыбы до величины 400-500 имп/с. ... Что же касается количественных закономерностей изменения периода следования во время движения животного к цели, то они в этих опытах остались невыясненными".

В четвертой главе работы [1] в качестве мишени использовался уголкового отражатель из жести. В результате опытов по дальней локации было установлено, что при расстоянии 160 м до уголкового мишени из жести афалина лоцировала с межимпульсным интервалом 180 мс, т.е. на 40 мс меньше расчётной величины, соответствующей данному расстоянию (расчётной дальности без коэффициента перекрытия).

Там же был сделан вывод о том, что, очевидно, для данных условий опыта это расстояние лежит за пределами возможности обнаружения дельфином используемой мишени. "Остаются невыясненными причины и закономерности периодических изменений частоты повторения, наблюдаемых в опытах. ... Можно предположить, что дельфин обнаруживал рыбу в самом начале своего движения и, продолжая это движение, мог облучать всю интересующую его акваторию перед собой, пытаясь обнаружить или обнаруживая различные препятствия, предметы, живые и неживые, которые, как правило, имеются в вольере".

Для анализа и объяснения несоответствия межимпульсного интервала 180 мс расстоянию до уголкового отражателя 160 м переведём миллисекунды в частоту следования импульсов: ~ 5.5 Гц. Данная частота не содержит информации о дальности, но, сравнив её с данными таблицы 1 из ста-

Таблица 1 – Частоты следования зондирующих импульсов морских млекопитающих в зависимости от объекта поиска

Объект поиска	Частота следования импульсов, Гц	Примечание
Рыба терпуг	205	кошатка
Рыба макрель (кусок)	190	афалина
Рыба лосось	160	кошатка
Крышка (полистирол)	30	белуха
Цилиндр (сталь)	16 и 24	белуха
Шар (сталь)	8	белуха

ти [7], можно предположить, что лоцируемый объект является металлической мишенью, а не рыбой или мишенью из полистирола.

Предположим, что дельфин, излучая зондирующие импульсы с частотой следования ~ 5.5 Гц, “озвучил” мишень и, обнаружив от неё отклик, принял решение о наличии мишени.

Вероятно, что на меньших дистанциях до мишени дельфин лоцировал и классифицировал её при помощи одиночных (или двойных) регулярных импульсов, удовлетворяющих парадигме щелчка-эха-щелчка.

В статье [6] для объяснения несоответствия межимпульсных интервалов зондирующих импульсов обученных морских млекопитающих эхолокационной парадигме авторы предполагали, что афалины используют пакеты импульсов для контроля относительно больших целей на большом расстоянии в уже известных или предсказуемых случаях. В их опытах принимали участие два дельфина: 36-летняя самка и 23-летний самец.

В большинстве опытов афалины должны были

обнаруживать мишень и двигаться к ней вплотную. Начальное расстояние до мишени ~ 120 м.

На рисунке 1 приведены результаты оценивания расстояния на основе задержки между временем возвращения эха (временем пачки импульсов) и следующего импульса как функции времени. Если щелчки были одиночными и регулярными, то они отмечались чёрной точкой, в случае излучения пакета импульсов – синей точкой. Вставка в рисунок 1 фрагмента кадра из видео JEB189217. MovieS1.avi, прилагаемого к [6], показывает межимпульсные интервалы, характерные для больших расстояний до мишени.

Из вручную отобранных пакетов импульсов 95% были произведены с задержками, превышающими 168 мс после предыдущего импульса, 95% межимпульсных интервалов в пакете были короче, чем 47 мс, и 95% пакетов сопровождалось задержками, превышающими 167 мс перед следующим излученным импульсом. Вручную отобранные пакеты содержали от 2 до 9 импульсов. С учётом этой информации исследователями была напи-

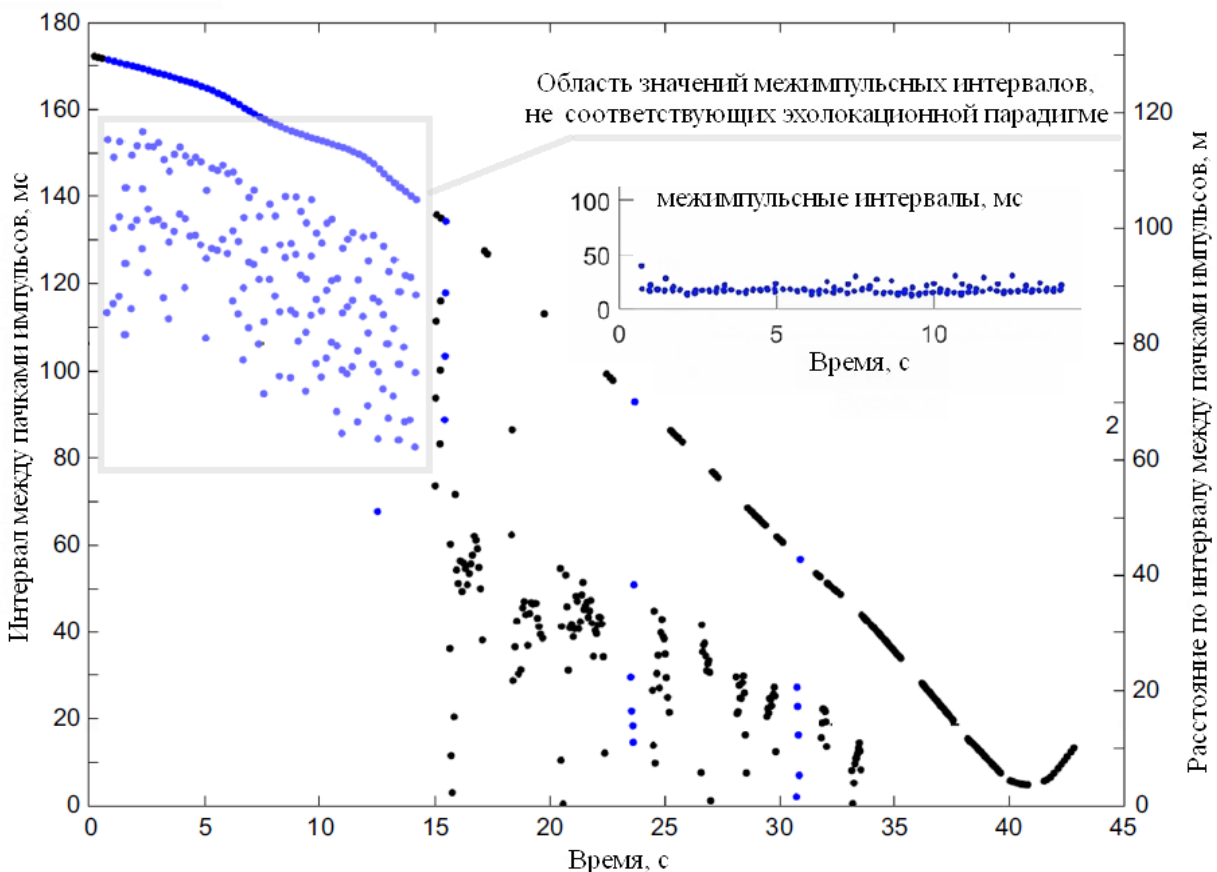


Рисунок 1 – Результаты оценивания расстояния на основе задержки между временем возвращения эха и следующего импульса как функции времени [6]

сана программа для автоматического определения межимпульсного интервала.

Пакеты импульсов были произведены с интервалами между пакетами, превышающими время прохождения пакета до мишени и обратно в 87% и 79% случаев для первого дельфина ( $N = 663$ ) и второго дельфина ( $N = 321$ ), соответственно, при этом интервал между пакетами измерялся как интервал между первым импульсом в пакете и предыдущим импульсом.

Когда брали за интервал между пакетами интервал от последнего щелчка пакета до последующего импульса, то 90% и 91% интервалов между пакетами превысили время прохождения пакета до мишени и обратно для первого дельфина и второго дельфина, соответственно.

Попробуем объяснить эхолокационное поведение дельфинов в начале опытов, когда межимпульсные интервалы (внутри пакетов импульсов) были меньше времени прохождения импульсов до мишени и обратно. Для этого рассмотрим состав мишени. Мишень состояла из двух стальных пластин  $30 \times 25$  см (толщиной 0.5 мм), встроенных в деревянную раму. Пластины были помещены вертикально, скреплены друг с другом под прямым углом и подвешены под водой с помощью металлического цилиндрического шеста (длина 2.4 м, диаметр 3.8 см и толщина стенки 0.15 см). Чтобы увеличить силу цели, пластины были обёрнуты в пузырчатую упаковку толщиной 8-10 см (на самом деле 8-10 мм) и поворачивались к дельфину как раскрытая книга (в качестве уголкового отражателя).

Из рисунка 1 видно, что результаты оценивания величины задержки между временем возвращения эха и следующего импульса для расстояний до мишени более 60 м обозначены синими точками. Это значит, что они не соответствуют эхолокационной парадигме. Возможно, это связано с тем, что пузырчатая упаковка искажала отклик от мишени, а также с тем, что более опытному дельфину давали сложное задание: если в процессе сближения с мишенью её поворачивали на определённый угол ( $\sim 90^\circ$ ), то дельфин должен был прекратить выполнение задания и вернуться в исходную точку.

Если допустить, что дельфины озвучивали мишень [6] на 120 м, излучая зондирующие импульсы с межимпульсными интервалами в пакетах короче 47 мс (с частотой следования  $\sim 24$ -56 Гц), то с учётом данных таблицы 1 можно сделать правильное предположение, что мишень была из стали.

Возможно, из-за пузырчатой упаковки мишени афалины чаще выбирали частоты следования импульсов 40-56 Гц (25-17.8 мс), чем частоты 24-32 Гц.

В 16-ти испытаниях, когда мишень поворачивали, межимпульсный интервал сокращался примерно в два раза. Это происходило в те моменты времени, когда расстояние до мишени было в диапазоне 20-100 м.

На рисунке 1 синие точки есть и на меньших расстояниях до мишени (на 24 с и на 31 с). Это также говорит не в пользу эхолокационной парадигмы.

#### **Гипотеза “озвучивания” мишеней морскими млекопитающими**

*“Теории подобны мышам  
– они проходят через  
девять дыр и застревают  
в десятой”.*  
Вольтер

Зададимся вопросом: зачем дельфину постоянно контролировать дистанцию до мишени, если ему специально не поставлена такая задача в рамках эксперимента? Ведь скорость движения позволяет дельфину легко настигнуть любой обнаруженный подводный объект, а количество получаемого корма не зависит от пройденного им расстояния.

Более логичной, по нашему мнению, является гипотеза озвучивания морскими млекопитающими мишеней, находящихся на больших дистанциях.

Морское млекопитающее сначала, с помощью зондирующих импульсов, излучаемых с частотой, кратной 8 Гц (8, 16, 24) [7], озвучивает стальную мишень (“заставляет её гудеть” или пульсировать), а затем, за счёт бинауральных возможностей биолокатора, пеленгует её местоположение с точно-

стью, требующей периодической корректировки направления, и движется в сторону мишени.

Предполагаются три возможных варианта озвучивания морскими млекопитающими мишеней, изготовленных из различных материалов:

- I вариант: щелчок-отклики.
- II вариант: щелчок-от(-щелчок-)клики.
- III вариант: щелчки-отклик.

Очевидно, что первый вариант может быть принят за “щелчок-эхо”.

Металлические мишени озвучиваются по первому и второму варианту.

В представленном в статье [7] фрагменте записи локационного сигнала по мишени типа “полистироловая крышка” на 5 локационных импульсов белухи приходится всего 2-3 отклика мишени. Эти данные подходят под третий вариант озвучивания мишеней морскими млекопитающими.

Рассмотрим особенности откликов от мишени из стали, подтверждающие гипотезу озвучивания.

На рисунке 2 из статьи [7] приведён фрагмент записи локационного сигнала белухи *Delphinapterus leucas* (Pallas, 1776) длительностью 0.35 с по мишени типа “стальной цилиндр”. Запись производилась с двух гидрофонов. Расстояние до мишени 43 м. Частота следования импульсов в середине серии изменялась в пределах: 24–24.5 Гц. Расчётная дальность ~ 30 м.

Так как есть доступ к исходному файлу с этой записью, изменим интервал времени по оси

абсцисс и уровни вывода сигнала по оси ординат.

На рисунке 3 приведён фрагмент той же записи сигнала белухи с ограничением безразмерного уровня сигнала  $\pm 50$  и длительностью 0.5 с.

На рисунке 4 приведён фрагмент той же записи, но без зондирующих импульсов белухи. Для отфильтровывания локационного сигнала белухи использовались возможности программы Adobe Audition 3.0.

**Обсуждение гипотезы**

Из рисунка 3 видно, что за время 0.5 с зондирующие импульсы белухи “заставили” звучать стальной цилиндр с уровнями излучения выше ожидаемых уровней эха. Частота звучания стального цилиндра, измеренная с помощью процедуры быстрого преобразования Фурье, составила ~ 275 Гц.

Это даёт основание полагать, что гипотеза озвучивания мишеней морскими млекопитающими имеет право на существование, т.к. предоставляет исследователям возможность разгадки феномена обнаружения и пеленгования мишеней морскими животными на больших расстояниях.

По форме откликов от стального цилиндра (рисунок 4) можно сделать следующее предположение: когда морское млекопитающее излучает зондирующие сигналы в режиме озвучивания, то происходит только генерация поверхностных волн на мишени [7], а эха от мишени нет. Для подтверждения этого требуется провести дополнительные исследования.

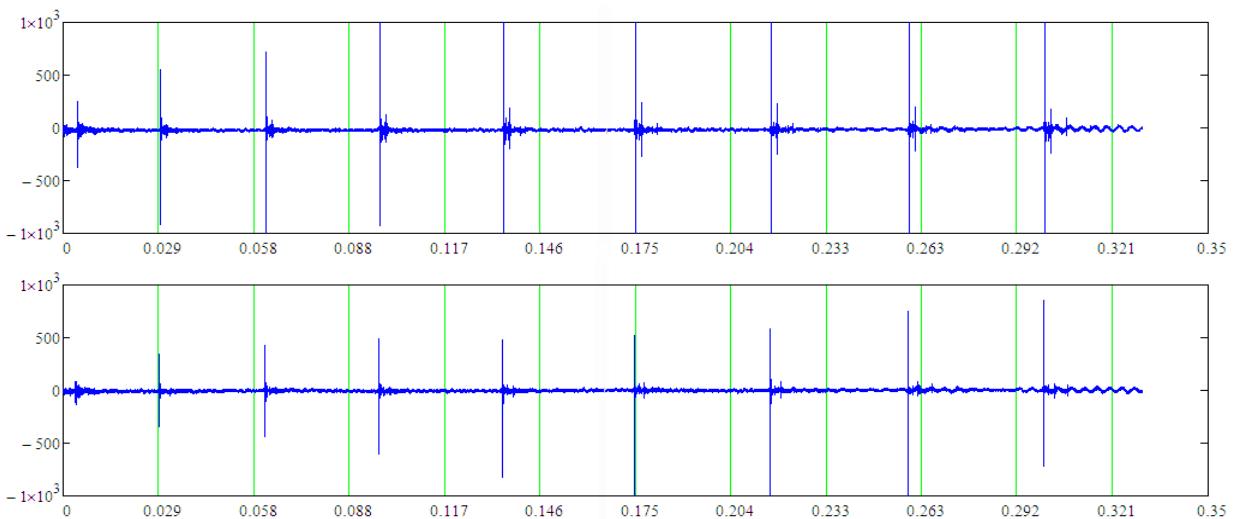


Рисунок 2 – Фрагмент записи локационного сигнала белухи по мишени типа “стальной цилиндр” с левого (вверху) и правого (внизу) гидрофона [7]

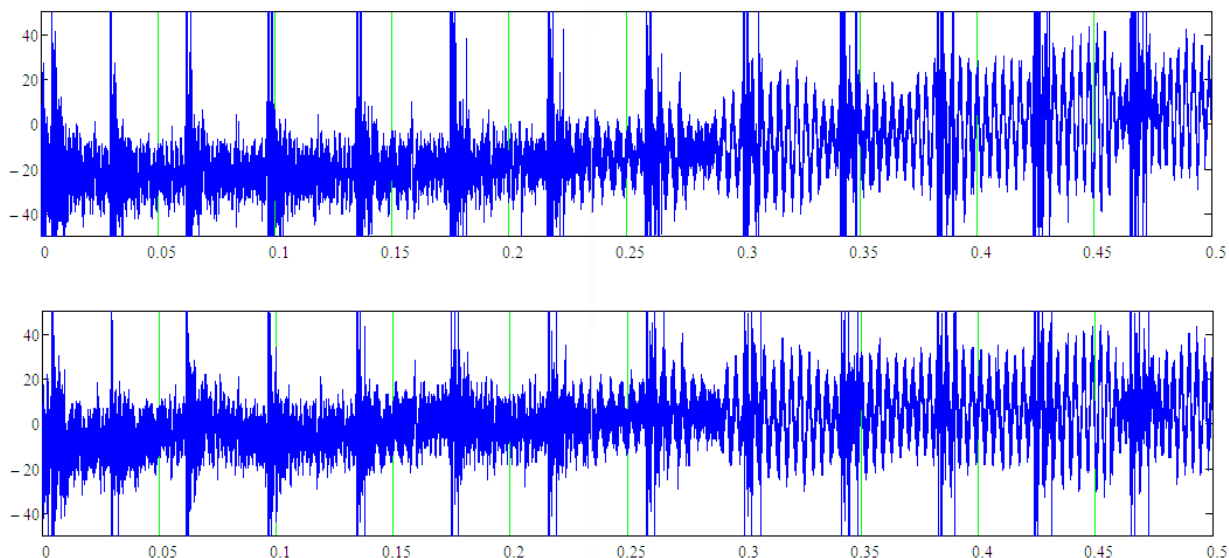


Рисунок 3 – Фрагмент записи сигнала белухи с ограничением уровня сигнала  $\pm 50$  с левого (вверху) и правого (внизу) гидрофона

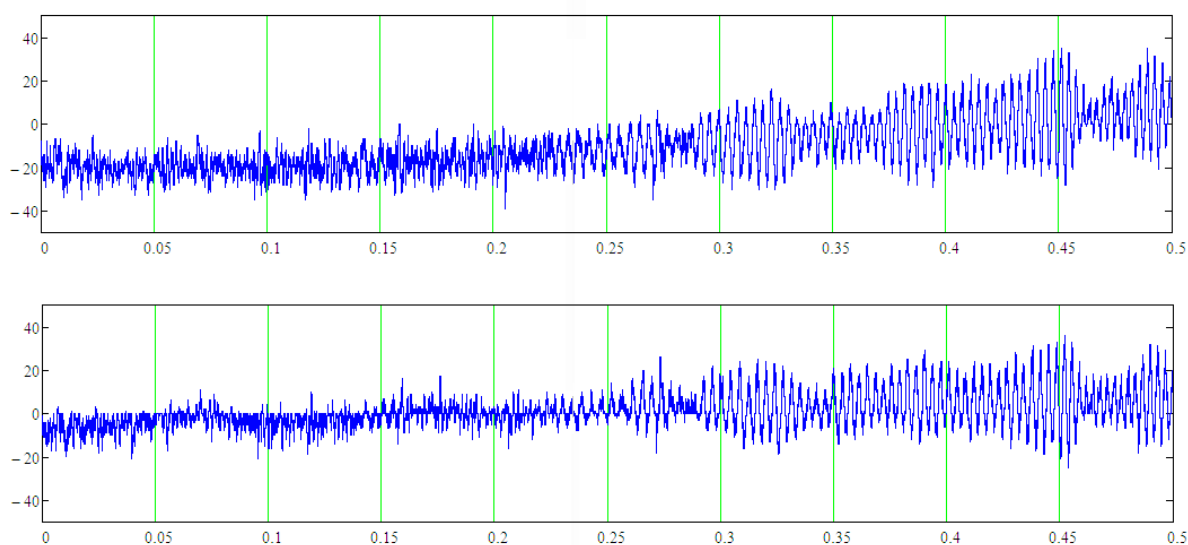


Рисунок 4 – Фрагмент записи без зондирующих импульсов белухи

Косвенно это подтверждается в работе [6]. При анализе записей протокола испытаний экспериментаторами было отмечено, что эхо от цели часто наблюдалось, когда до неё оставалось 25-30 м.

С помощью гипотезы озвучивания это можно объяснить так: в начале каждого опыта и в процессе сближения (до 30 м) афалины “заставляли” звучать мишень на низкой частоте, а все низкочастотные шумы из записей эха от мишени были отфильтрованы с помощью 10 кГц фильтра Баттерворта.

Необходимо учитывать, что рядом с мишенью может находиться живая рыба. Частота

следования зондирующих импульсов по рыбам  $\sim 160-205$  Гц (из таблицы 1), а при захвате рыбы 400-500 Гц [1]. Соответственно, диапазон межимпульсных интервалов для обнаружения рыб может составлять 2.5-6.25 мс. В опытах [6], при подходе к мишени вплотную, дельфины использовали короткие межимпульсные интервалы  $\sim 15$  мс вероятнее всего для финального озвучивания стальной мишени, а не для поиска рыбы-корма, с учётом того, что тренер бросал морскому животному рыбу-корм в воду только после окончания опыта. Тем не менее, возможное эхолокационное поведение обученных морских животных по поиску рыбы (озвучиванием) необходимо учиты-



вать при анализе значений межимпульсных интервалов.

С помощью гипотезы озвучивания можно попробовать разобраться с особенностью слуха афалин: "... в противоположность человеку, у которого область наилучшего различения сигнала по частоте совпадает с областью наиболее хорошо слышимых частот, у дельфинов эти области лежат в разных частотных диапазонах. У афалин наилучшее различение сигналов по частоте приходится на диапазон 2-20 кГц, а область высокой чувствительности слуха – 50-70 кГц" [3, с. 399].

Вероятно, при работе биолокатора в режиме озвучивания морские млекопитающие обнаруживают и пеленгуют объекты поиска по их собственному звучанию и пульсациям в "коммуникационном" для морских животных диапазоне частот 0.2-20 кГц (с уровнями излучения выше, чем уровни входящих эхоимпульсов), а для обнаружения слабых эхосигналов от малоразмерных объектов в режиме эхопеленгования им требуется высокая чувствительность слуха в диапазоне 50-70 кГц.

Гипотеза озвучивания позволяет объяснить следующий факт: когда морские млекопитающие охотятся в составе группы, их зондирующие импульсы не мешают друг другу. Одно морское животное озвучивает объект охоты, и он начинает излучать на своей резонансной частоте. Остальным животным достаточно только пеленговать данный объект. Им понятно, к какому типу объекта поиска он относится. Если бы при этом возникло эхо, оно им бы только мешало.

Во многих экспериментах исследователи размещают рядом с мишенью приёмный гидрофон. Морские млекопитающие могут начинать работу по поиску мишени с озвучивания гидрофона, если он будет являться ориентиром энергетически более экономичным для поиска, чем мишень.

Необходимо отметить, что в системах радиолокации, оптической локации также рассматриваются свойства переотражения сигналов, связанные со свойствами объектов, например, световозвращение в оптике.

## Выводы

1. Гипотеза озвучивания мишеней морскими млекопитающими может помочь исследователям приблизить момент разгадки феномена обнаружения и классификации мишеней на больших расстояниях и в условиях помех.

2. Для увеличения поисковой производительности перспективных гидроакустических станций зондирующие импульсы внутри пакетов должны излучаться с частотой следования, согласованной со свойствами материала объекта поиска.

3. Требуется проведение дополнительных исследований по проверке предположения об отсутствии эхосигналов от мишеней при работе биолокатора в режиме озвучивания.

## Список литературы

1. *Акопиан А.И.* Исследование закономерности изменения частоты следования эхолокационных сигналов дельфина *Tursiops truncatus*: дис. ...канд. биол. наук. – СПб, 1995. – 139 с.
2. *Иванов М.П.* Эхолокационные сигналы дельфина (*Tursiops truncatus*) при обнаружении и распознавании подводных объектов: дис. ...канд. биол. наук. – СПб, 2000. – 137 с.
3. *Айрапетьянц Э.Ш., Константинов А.И.* Эхолокация в природе / 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Наука, Ленингр. отд-ние, 1974. – 512 с.
4. *Иванов М.П.* Эхолокационные сигналы дельфина при обнаружении объектов в сложных акустических условиях // *Акуст. журн.* – 2004. – Т. 50, № 4. – С. 550-561.
5. *Иванов М.П., Мухачёв Е.В., Исаков Д.Ю., Данилов Н.А., Овчинников К.Э., Розум А.В., Соколов П.А.* Идентификация сигналов дельфина в условиях лабораторного эксперимента в открытой воде // *Прикладные проблемы безопасности технических и биотехнических систем.* – 2018. – № 2. – С. 14-24. – DOI: 10.25960/2500-2538.2018.2.14.
6. *Ladegaard M., Mulsow J., Houser D.S., Jensen F.H., Johnson M., Madsen P.T., Finneran J.J.* Dolphin echolocation behaviour during active long-range target approaches // *J. Exp. Biol.* – 2019. – Vol. 222. – P. 1-12. – DOI: 10.1242/jeb.189217.

7. Карпиченко С.Е. Анализ возможных причин выбора частоты следования зондирующих импульсов, произведенных морскими млекопитающими при различных формах активности // Национальная безопасность и стратегическое планирование. – 2021. – № 2 (34). – С. 52-57. – DOI: 10.37468/2307-1400-2021-2-52-57.

*Статья поступила в редакцию 16 апреля 2022 г.*

*Принята к публикации 12 июня 2022 г.*

**Ссылка для цитирования:** Карпиченко С. Е. Морские млекопитающие и парадигма щелчок–эхо–щелчок // Национальная безопасность и стратегическое планирование. 2022. № 2(38). С. 34-41. DOI: <https://doi.org/10.37468/2307-1400-2022-2-34-41>

**Сведения об авторах:**

**КАРПИЧЕНКО СТАНИСЛАВ ЕВГЕНЬЕВИЧ** – сотрудник Федерального государственного унитарного предприятия «Государственный научно-исследовательский институт прикладных проблем», (ФГУП «ГосНИИПП»), г. Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: [karpichenko@mail.ru](mailto:karpichenko@mail.ru)