

ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОЙ АНАЛИЗ ПОДВОДНЫХ ЗВУКОВ МОРСКИХ МЛЕКОПИТАЮЩИХ. ЗУБАТЫЕ КИТЫ

Лисиутин В.А., Ластовенко О.Р., Дегтяр А.Д., Ярошенко А.А., Петренко Н.В., Лучин В.Л., Рыбакова К.А., Мирошниченко Е.В.

Севастопольский государственный университет

ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, РФ; e-mail: vlisiutin@mail.ru

Поступила в редакцию: 03.08.2020

Аннотация. Изучение подводных звуков, излучаемых зубатыми китами востребовано с точки зрения экологии, подводной навигации, военных применений. Механизмы излучения и приема звуков зубатыми китами представляют собой наиболее сложные проблемы биоакустики. Изучение, анализ и систематизация звуков китообразных может дать возможность идентификации вида и количества особей. С другой стороны, зубатые киты являются излучателями самых высокочастотных звуков со сложными видами модуляции. Если известно расположение источника и приемника, частотно-временной анализ звукового поля может быть использован для инверсии акустических свойств волновода. В работе приводится обзор видов морских млекопитающих – зубатых китов и излучаемых типов высокочастотных звуков. Результаты представляются в виде временных реализаций и спектрограмм. Показывается, что волноводные условия распространения звука вносят специфические дисперсионные искажения. Между излученным и зарегистрированным с помощью гидрофона звуком может быть большая разница. Показывается принципиальная возможность использования высокочастотных звуков млекопитающих для решения задач инверсии акустических свойств волновода.

Ключевые слова: звуки морских млекопитающих, частотно-временной анализ, многолучевой характер распространения.

Введение.

Изучение подводных звуков, излучаемых зубатыми китами (дельфинами) востребовано с точки зрения экологии, подводной навигации, военных применений. Возможности биологической мимикрии, когда продолжительные сигналы используются для синхронизации канала связи, а импульсные – для передачи битов информации может использоваться для создания скрытого канала связи, имеющего низкую вероятность обнаружения и перехвата. Идея акустической мимикрии заключается в разработке такого вида модуляции информационного сигнала, который имитирует естественные звуковые ландшафты подводной среды. Механизмы излучения и приема звуков зубатыми китами представляют собой наиболее сложные проблемы биоакустики [1-7]. Известно, что дельфины распознают цели на основании одного короткого эхо-сигнала, не используя принципа накопления. Излучающая система зубатых китов способна варьировать интенсивность, частоту, длительность зондирующих импульсов в широких пределах.

Данная статья является обзорной, в значительной степени основанной на анализе открытых иностранных источников. Записи звуков взяты в основном с сайта [8].

Зубатые Киты (Toothed Whales).

На рисунке 1 показаны китообразные: 1 – Обыкновенный дельфин, короткоклювый обыкновенный дельфин (*Delphinus delphis*—**Common Dolphin, Short-beaked Common Dolphin**); 2 – Карликовая касатка (*Feresa attenuata*—**Pygmy Killer Whale**); 3 – Тропическая гринда (*Globicephala macrorhynchus*—**Short-Finned Pilot Whale**); 4 – Обыкновенная гринда (*Globicephala melas*—**Long-Finned Pilot Whale**); 5 – Австралийский курносый дельфин (*Orcaella heinsohni*—**Australian Snubfin Dolphin**); 6 – Касатка (*Orcinus orca*—**Killer Whale**); 7 – Малая, или черная касатка (*Pseudorca crassidens*—**False Killer Whale**); 8 – Вертящийся продельфин, или длиннорылый продельфин (*Stenella longirostris*—**Long-Snouted Spinner Dolphin**); 9 – Индийская афалина, пятнистая афалина (*Tursiops aduncus*—**Indian Ocean Bottlenose Dolphin, Spotted Bottlenose Dolphin**); 10 – Афалина (*Tursiops truncatus*—**Bottlenose Dolphin**); 11 – Кашалот (*Physeter macrocephalus*—**Sperm Whale**).

Обыкновенный дельфин, короткоклювый обыкновенный дельфин (*Delphinus delphis*—**Common Dolphin, Short-beaked Common Dolphin**). Самый распространенный вид семейства дельфиновых. Длина тела около 160-260 см, но в Черном море не превышает 210 см, при этом вес достигает 110 кг. Дельфины очень стройные, с длинным клювом, резко отграниченным от жировой подушки бороздками. На небе 2 глубоких продольных желоба. Зубы острые, многочисленные, вверху и внизу по 40-50 пар (всего 160-200 штук), толщиной 2-3 мм.

Карликовая касатка (*Feresa attenuata*—**Pygmy Killer Whale**). Внешностью они напоминают черных касаток в миниатюре. В длину достигают 2,5 метра, а вес – до 170 кг. Голова их относительно маленькая, спереди закругленная, без клюва, с небольшим ртом. Спинной плавник 20-30 см высотой, треугольной формы, неглубоко вырезан по заднему краю. Зубы крепкие, наверху 8-12 пар, внизу 10-13 пар, диаметром у десны 6-7 мм, в корне 10 мм.

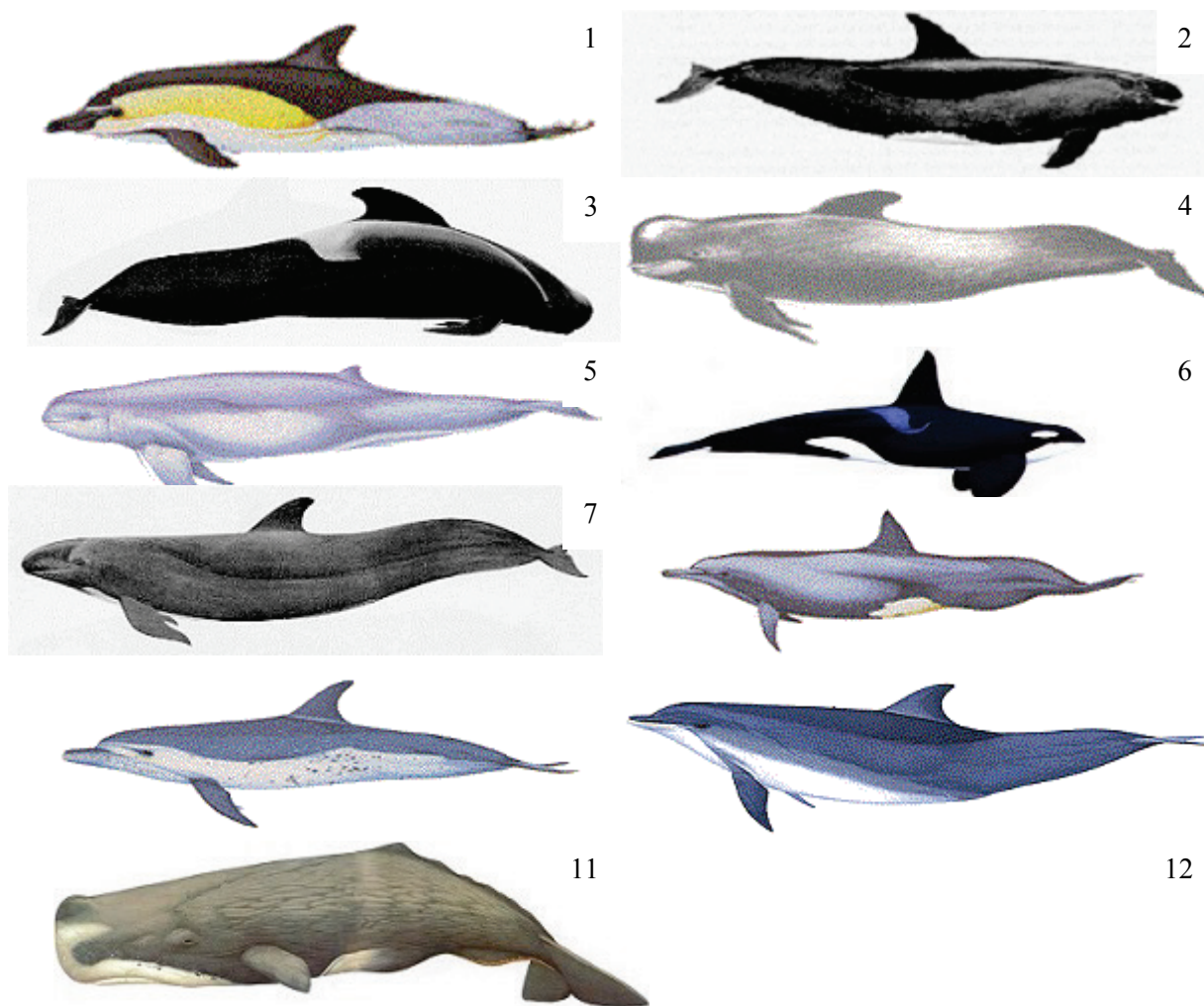


Рисунок 1. Зубатые киты

Тропическая гринда (*Globicephala macrorhynchus*—**Short-Finned Pilot Whale**). Длина взрослой особи – 3,6-6,5 метров, вес – от 1 до 4 тонн. Имеет всего 6-8 зубов в каждом ряду. Отличается самыми короткими в роде грудными плавниками (около 1/6 длины тела или даже еще короче). Биология изучена слабо.

Обыкновенная гринда (*Globicephala melas*—**Long-Finned Pilot Whale**). Взрослые особи достигают 6 метров в длину при весе 3,5 тонны. Почти вся черная, но на брюхе есть белый рисунок в виде якоря. Изредка может быть светлое заглазничное пятно и седло позади спинного плавника. Грудные плавники от 1/4 до 1/5 длины тела. Имеет 8-11 пар зубов сверху и 9-12 пар внизу.

Австралийский курносый дельфин (*Orcaella heinsohni*—**Australian Snubfin Dolphin**). Шарообразно закругленная спереди голова короткая и широкая. Умеренно длинные грудные плавники расширены у основания. Спинной плавник серповидно вырезан на заднем крае. Общая окраска тела шиферно-серая, снизу несколько светлее. В длину достигают 2,6 метра при весе до 150 кг. По 12-14 зубов в каждом ряду, толщиной 0,5 мм.

Касатка (*Orcinus orca*—**Killer Whale**). Крупнейшие и очень проворные плотоядные дельфины. Вес взрослого – 2,6-9 т. Длина взрослой особи-самки до 8,7 м (с числом дентиновых слоев на зубах до 29), самцы до 10 м. Голова умеренной величины, широкая, сверху слегка уплощенная, снабжена мощными жевательными мышцами, обеспечивающими крайне сильный прикус. Лобно-носовая подушка низкая, клюв не выражен. Все плавники сильно увеличены, в особенности спинной. Зубы массивные, по 10-13 пар сверху и внизу, уплощены спереди назад.

Малая, или черная касатка (*Pseudorca crassidens*—**False Killer Whale**). Малая касатка сугубо стадный вид. Очень крупные, стройные, сплошь темные, почти черные, дельфины. Длина взрослого – самки до 5 м, самцы до 6 м. Вес взрослого – до 1360 кг. Голова небольшая, сверху уплощенная, спереди тупо закруглена, без клюва. Грудные плавники узкие и заостренные. Спинной плавник глубоко вырезан. Зубы крепкие, по 8-12 пар сверху и внизу, толщиной до 27 мм.

Вертящийся продельфин, или длиннорылый продельфин (*Stenella longirostris*—**Long-Snouted Spinner Dolphin**). Славится как отличный прыгун: в воздухе, пока летит, он успевает 2-3 раза (до 7) повернуться вокруг своей оси, за что и получил название "вертящийся". Длина достигает 2,1 метра, вес достигает 75 кг. Спинной плавник треугольный или слегка изогнутый, наклонен вперед. Основание хвоста у взрослых самцов выпуклое сверху и снизу. Вверху и внизу по 52 пары зубов. Иногда к зубам прикрепляются грозди усонюгих раков из рода конходермы.

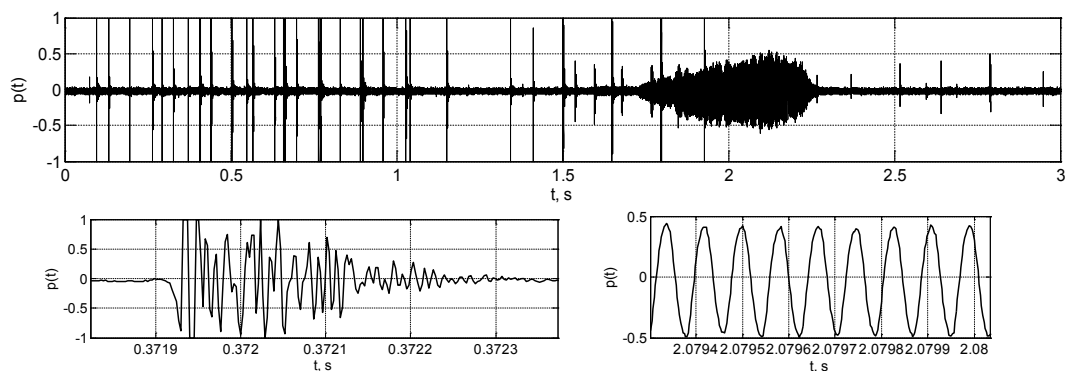


Рисунок 2. Панорама реализации звука обыкновенного дельфина (верхняя панель) и детализация импульсного и тонального звука

Индийская афалина, пятнистая афалина (*Tursiops aduncus*—**Indian Ocean Bottlenose Dolphin, Spotted Bottlenose Dolphin**). Индийская афалина очень похожа на обычную афалину по внешнему виду. Этот дельфин вырастает до 2,6 м в длину, а вес до 230 кг. Она также имеет от 23 до 29 зубов на каждой стороне каждой челюсти

Афалина (*Tursiops truncatus*—**Bottlenose Dolphin**). Афалина изучена лучше и полнее всякого другого вида дельфинов. Умеренно развитый клюв четко ограничен от выпуклой лобно-носовой (жировой) подушки. Череп достигает в длину 58 см. Небо плоское, без боковых желобов. Спинной плавник высокий, на широком основании, сзади полулунно вырезан. Грудные плавники у основания широкие, к концу заостряются, по переднему краю выпуклые, а по тонкому заднему вогнутые. Длина взрослого - дельфина средней величины: 1,9-3 м, редко до 3,6 м длиной. Самцы на 10-20 см больше самок. Вес взрослого - 150-400 кг. Зубы крепкие, конически заостренные, 6-10 мм толщиной, 19-28 пар вверх (40-52) и на 1-3 пары меньше вниз (36-48).

Кашалот (*Physeter macrocephalus*—**Sperm Whale**). Это крупнейший зубатый кит. Взрослые особи размером 18 м весят до 50 тонн. Огромная, притупленная спереди и сдавленная с боков голова составляет 1/4-1/3 часть всей длины тела; у самцов она крупнее, чем у самок. Спинной плавник имеет вид толстого и низкого горба, за ним еще несколько (2-6) горбов поменьше. Грудные плавники широкие и тупо закругленные. На нижней челюсти 18-30 пар колышковидных зубов без эмали, достигающих 27 см в длину. Крупнейшие зубы достигают почти 1,6 кг.

Частотно-временной анализ звуков.

Обыкновенный дельфин, короткоклювый обыкновенный дельфин (*Delphinus delphis*—**Common Dolphin, Short-beaked Common Dolphin**). Свистки имеют частоту от 3 до 24 кГц и продолжительность 0,01-4 с. Также слышен импульсный звук на частоте 2-14 кГц длительностью 0,5-0,75 с. Пик щелчков находится в диапазоне между 23 и 67 кГц и имеют полосу частот 17-45 кГц, они длятся 50-150 мкс. Панорама реализации показана на рисунке 2.

Как видно на панораме реализации, звук состоит из коротких импульсных посылок и длительного тонального звука – свиста с частотой 10 кГц. Звук записан специализированной аппаратурой с частотой дискретизации 384 кГц и прослушать его с помощью обыкновенной звуковой карты компьютера невозможно.

Карликовая касатка (*Feresa attenuata*—**Pygmy Killer Whale**). Спектральные характеристики их щелчков (10-150 кГц, 25 мкс, 197-223 дБ/1мкПа) были записаны в северной части Индийского океана. Свист имеет несущую частоту свыше 5 кГц, часто достигает пика около 10 кГц и длится 0,3-0,8 с. Импульсные звуки с всплеском имеют частоту выше 3 кГц до частоты Найквиста, и обычно длится 1-3,5 с. Панорама реализации сигнала и спектрограмма приведены на рисунке 3. Как видно, сравнивая рисунки 2 и 3, импульсные звуки дельфина и касатки очень похожи. Тональный свист имеет частоту 10 кГц и явно видную вторую гармонику (в отличие от тонального свиста дельфина – там синусоида очень чистая). На слух (здесь частота дискретизации 48 кГц) звуки воспринимаются буквально как свист очень высокой частоты и на его фоне громкие щелчки типа электрических высоковольтных разрядов.

Тропическая гринда (*Globicephala macrorhynchus*—**Short-Finned Pilot Whale**). Излучают свистки с основными частотами от 1 до 20 кГц и длительностью 0,1- 5 с. Импульсные звуки охватывают полосу частот от 1 до более 30 кГц, длительностью до 1,5 с. Тропические гринды используют бифонации, то есть одновременное испускание двух вокализаций одной и той же особью. Щелчки и жужжание при поиске пищи во время глубокого погружения были зарегистрированы с пиковой частотой 8-39 кГц и 0,2-1,2 мс на щелчок. Также этот вид копирует тональные звуки антропогенных источников (например, среднечастотный сонар). Пример копирования сонара и на фоне тонального звука щелчки – на рисунке 4.

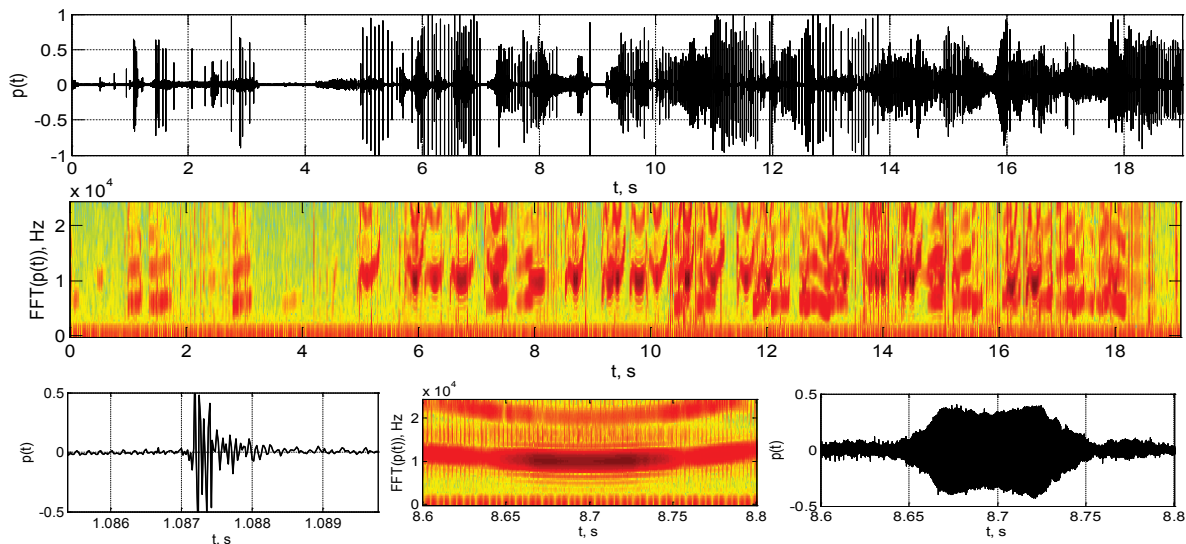


Рисунок 3. Панорама реализации спектрограмма звука карликовой касатки (верхняя панель) и детализация импульсного и тонального звука

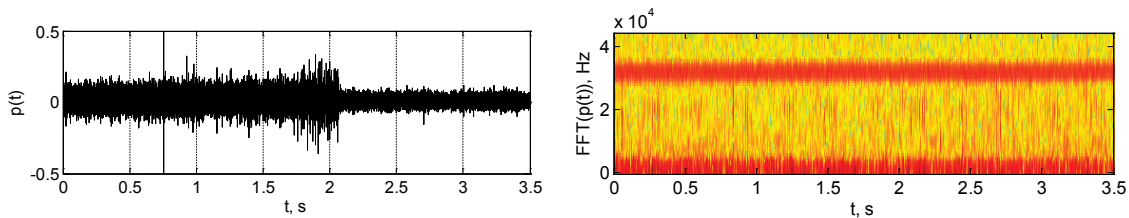


Рисунок 4. Тропическая гринда имитирует тональный сонар. Частота 32 кГц

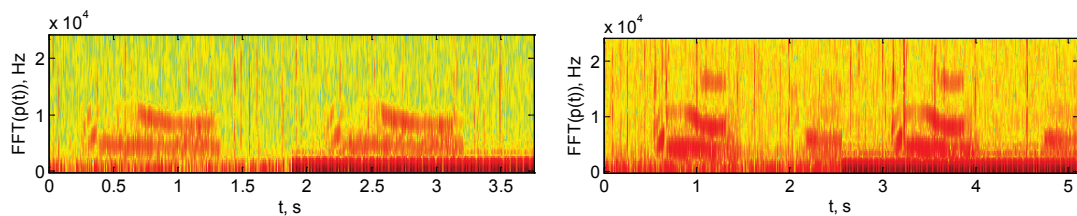


Рисунок 5. Обыкновенная гринда свистит

Обыкновенная гринда (*Globicephala melas*—**Long-Finned Pilot Whale**). В Средиземноморье, на востоке США и в Канаде, а также на северо-западе Атлантики этот вид свистит между 1 и 11 кГц продолжительностью 0,1-3 с. Тональные сигналы издавались в диапазоне 1-8 кГц у берегов Ньюфаундленда. Импульсы всплеска охватывают более широкую полосу (100-22000 Гц) и длительностью 0,1-2,2 с. Также используют бифонации. Ритмичные повторяющиеся последовательности вызовов способствуют социальному поведению. На рисунке 5 приведены две спектрограммы с бифонациями, на слух воспринимаемыми как сверление скоростной бормашиной твердого зуба, когда возрастает прижатие сверла к зубу (понижается частота). Включающийся во второй половине спектрограммы низкочастотный фон – вероятно помеха.

Австралийский курносый дельфин (*Orcaella heinsohni*—**Australian Snubfin Dolphin**). Свистки имеют частоту в диапазоне от 600 Гц до 13 кГц и длятся 0,1–0,45 с. Импульсные звуки колеблются от 1 до более чем 22 кГц и длятся 4 ± 2 с. Последовательности щелчков охватывают диапазон от 300 Гц до более чем 22 кГц, длятся 0,1–20 с и имеют 10-46 щелчков/с. Гудения имеют до 116 щелчков/с. Панорама звука и две детализации приведены на рисунке 6.

Временная структура щелчков удивительно напоминает лучевую структуру единственного импульса, распространяющегося вдоль оси подводного звукового канала. Действительно, импульс состоит из «четверок» – четырех вступлений лучей, имеющих очень близкое, но немного разное время пробега [9]. Изменение очередности вступлений, появление эха может быть объяснено движением излучающего объекта в волноводе, при котором изменяется его глубина относительно оси звукового канала.

Касатка (*Orcinus orca*—**Killer Whale**). Касатки издают частотно модулированные звуки (свистки) переменной длительности (0,06–18,3 с) с частотным диапазоном 1-30 кГц. Редкие низкочастотные FM-звуки с основной частотой 50-270 Гц длительностью 0,1-2,8 с были получены из Исландии. Касатки также производят

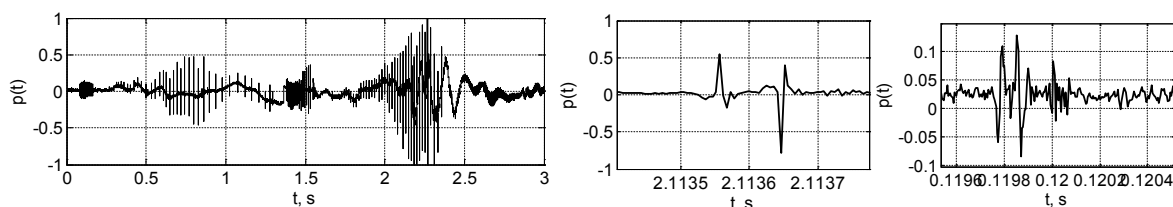


Рисунок 6. Панорама звука и детализации щелчков австралийского дельфина.

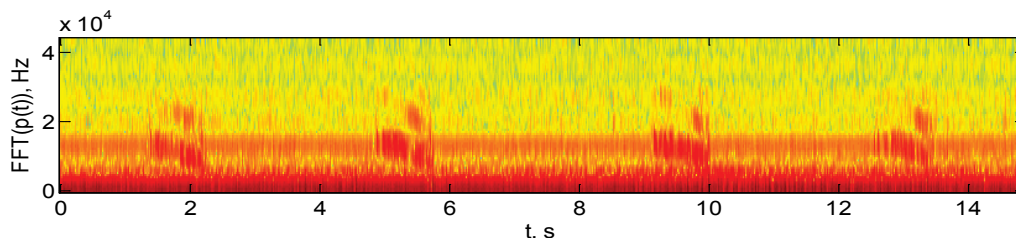


Рисунок 7. Спектрограмма звука черной касатки

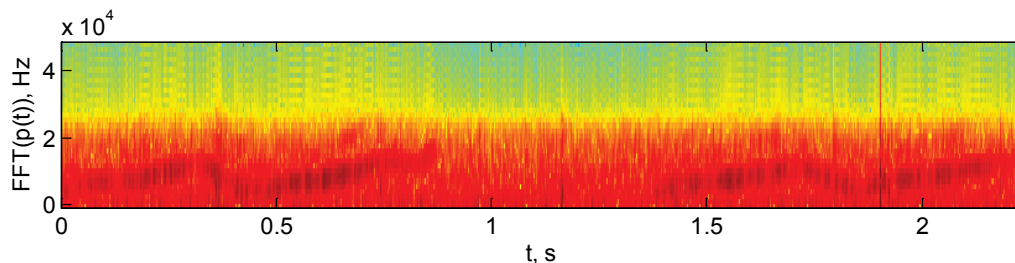


Рисунок 8. Спектрограмма звука индийской афалины

высокочастотные FM-звуки с частотой 16-75 кГц и уровнем источника 185-193 дБ. Тональные звуки редки (3-5 кГц, $0,37 \pm 0,08$ с). Их эхолокационные щелчки охватывают диапазон 10-110 кГц, 100-250 мкс, в последовательностях 3-7 с, на уровнях громкости 107-224 дБ.

Малая, или черная касатка (*Pseudorca crassidens*—**False Killer Whale**). Используют свистки на частоте 5-8 кГц длительностью 0,2-0,8 с. Их импульсные звуки состоят из серии быстрых импульсов синусоидальных сигналов, обычно в ускоряющейся последовательности импульсов. Импульсные звуки охватывают полосу 0,5-22 кГц и длятся 0,05-1 с. Иногда издают бимодальные щелчки, которые имеют два пика частоты, один из которых составляет около 40 кГц, а другой – около 100 кГц. Длительность щелчка колеблется от 18 до 530 мкс. На рисунке 7 приведена спектрограмма звуков черной касатки с негативной линейной частотной модуляцией.

Вертящийся продельфин, или длиннорылый продельфин (*Stenella longirostris*—**Long-Snouted Spinner Dolphin**). Этот вид издает звуки CW, но они постоянно смешиваются со звуками FM во время анализа. Свистки варьируются от 2 до 23 кГц и длятся от 0,1 до 1,8 с. Импульсные звуки охватывают полосу частот 220 Гц-130 кГц, длятся 0,05-2 с. Может быть 30 импульсов/цикл с длительностью 3,85 мс. Щелчки охватывают 20-130 кГц, длятся 0,2-0,4 мс с длительностью 121-235 мс.

Индийская афалина, пятнистая афалина (*Tursiops aduncus*—**Indian Ocean Bottlenose Dolphin, Spotted Bottlenose Dolphin**). Большинство исследований было проведено на свистках, которые варьируются по частоте от 1 до 22 кГц и по длительности от 0,1 до 5,9 с. Звуки тональные в основном объединены с частотно-модулированными, и поэтому их параметры не всегда различимы. Эхолокационные щелчки охватывают полосу частот от 45 до 109 кГц с пиковой частотой 124 ± 13 кГц, последние 18 ± 6 мкс, с интервалами между щелчками 63 ± 45 мс и исходными уровнями 205 ± 7 дБ. Спектрограмма показана на рисунке 8.

Если судить по спектрограмме, то наблюдаемые звуки имеют вид модулированных по частоте сначала по возрастающему закону, затем по убывающему и наоборот. Субъективно воспринимается как звук сирены детского автомобиля скорой помощи.

Афалина (*Tursiops truncatus*—**Bottlenose Dolphin**). Звуки обычно объединяются со свистками и называются “плоскими” свистками. Тональные и модулированные по частоте звуки звучат вместе в диапазоне частоты от 300 Гц до 39 кГц и от 40 мс до 4 с длительностью, с уровнем громкости 114-163 дБ. Частотно-модулированный звучит на более низкой частоте, иногда описывается отдельно и называется “низкочастотным узкополосным” звучит с частотой 30 Гц–1 кГц и длительностью 10 мс – 8,7 с. Импульсные звуки колеблются от нескольких кГц до более чем 150 кГц, длятся 0,1-4 с, со 150-1050 импульсами/с и уровням громкости около 195 дБ. Эхолокационные

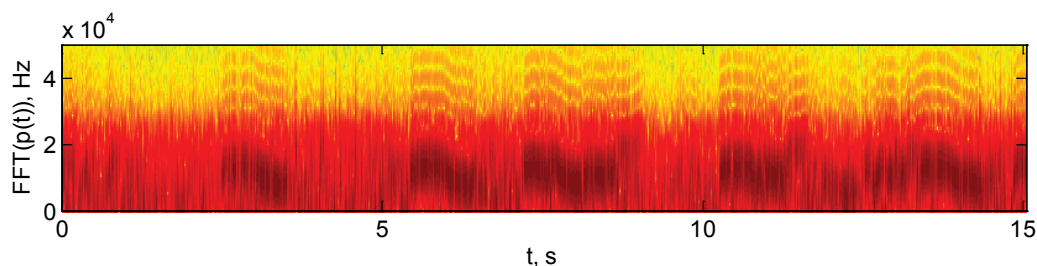


Рисунок 9. Спектрограмма звука афалины

щелчки колеблются от 20 до 150 кГц, достигая максимума между 50 и 110 кГц. Щелчки длятся 10-80 мкс с интервалами между щелчками 20-180 мс, $11,4 \pm 1,6$ кликов/цикл. Спектрограмма – на рисунке 9, где видно аналогичное рисунку 8 изменение частоты вверх-вниз

Кашалот (*Physeter macrocephalus*—**Sperm Whale**). Клики кашалотов теперь обычно классифицируются на пять классов в соответствии с их временной структурой:

1. “Писк” с частотой до 1600 кликов/с,
2. “Скрипы” с частотой до 220 щелчков/с,
3. “Обычные щелчки” с интервалами между щелчками около 0,5-1 с, и
4. “Медленные клики” (иногда называемые “одиночными кликами”) с длительными интервалами между кликами 3-8 с.

5. Социализирующиеся группы выделяют стереотипные последовательности щелчков (паттерны), называемые “кодами”, продолжительностью до нескольких часов.

Клики имеют полосу пропускания 100 Гц-30 кГц, с пиковой частотой около 15 кГц. Длительность щелчка составляет 0,2-3 мс. каждый щелчок может состоять из нескольких импульсов, а время между импульсами коррелирует с размером кашалота (головы).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Звуки, излучаемые зубатыми китами достаточно разнообразны и отражают условия существования в разнообразных условиях окружающей среды. Щелчки могут издаваться часто либо редко, в зависимости, вероятно от времени задержки выслушиваемого отклика. По-видимому, щелчки издаются поодиночке, их запись «четверками» обусловлена многолучевым характером распространения. Частотно-модулированные свисты отражают попытки «согласовать» параметры сигнала с окружающей средой, т.е. с законом дисперсии волновода мелкого или глубокого моря, в котором и обитает млекопитающее. Отметим, что закон дисперсии волновода мелкого моря определяется акустическими свойствами его дна [10-12]. Обращает внимание, что используется как позитивная (возрастание частоты), так и негативная (понижение частоты) частотная модуляция свиста.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и города Севастополь в рамках научного проекта № 18-42-920001.

Список литературы / References:

1. Erbe C., Dunlop R., Jenner K.C., Jenner M-N.M., McCauley R.D., et al. Review of Underwater and In-Air Sounds Emitted by Australian and Antarctic Marine Mammals. *Acoustic Australia*, 2017, vol. 45, pp. 179-241.
2. Романенко Е.В. Акустика дельфинов и рыб. *Акустический журнал*, 2019, т. 65, № 1, с. 82-92. [Romanenko E.V. Acoustics of Dolphins and Fish (Review). *Acoustical Physics*, 2019, vol. 65, no. 1, pp. 103-112. (In Russ.)]
3. Рутенко А.Н., Вишняков А.А. Временные последовательности гидроакустических сигналов, генерируемые белухой при поиске и лоцировании подводных объектов. *Акустический журнал*, 2006, т. 52, № 3, с. 375-384. [Rutenko A.N., Vishnyakov A.A. Time sequences of sonar signals generated by a beluga whale when locating underwater objects. *Acoustical Physics*, 2006, vol. 52, no. 3, pp. 314-323. (In Russ.)]
4. Дубровский Н.А., Урусовский И.А., Гладилин А.В. Модель генерации щелчков дельфина по типу антенны бегущей волны. *Акустический журнал*, 2009, т. 55, № 3, с. 423-430. [Dubrovsky N.A., Urusovskii I.A. Gladilin. A.V. A model of acoustic click production in the dolphin by analogy with a traveling-wave antenna. *Acoustical Physics*, 2009, vol. 55, no. 3, pp. 441-447. (In Russ.)]
5. Рябов В.А. Некоторые аспекты отражения ЧМ-сигналов (свистов) дельфинов в экспериментальном бассейне. *Акустический журнал*, 2019, т. 65, № 6, с. 853-860. [Ryabov V.A. Some Aspects of Reflection of Dolphin FM Signals (Whistles) in an Experimental Tank. *Acoustical Physics*, 2019, vol. 65, no. 6, pp. 771-777. (In Russ.)]
6. Сухорученко М.Н. Поведенческие исследования слухового различения дельфином пар импульсов-щелчков с одинаковым межимпульсным интервалом. *Акустический журнал*, 2008, т. 54, № 6, с. 1003-1008. [Sukhoruchenko M.N. Behavioral studies of the auditory discrimination of paired pulses with identical pulse spacings by a dolphin. *Acoustical Physics*, 2008, vol. 54, no. 6, pp. 874-879. (In Russ.)]

7. Иванов М.П. Эхолокационные сигналы дельфина при обнаружении объектов в сложных акустических условиях. *Акустический журнал*, 2004, т. 50, № 4, с. 550-561. [Ivanov M.P. Dolphin's echolocation signals in a complicated acoustic environment. *Acoustical Physics*, 2004, vol. 50, no. 4, pp. 469-479. (In Russ.)]
8. <https://cmst.curtin.edu.au/research/marine-mammal-bioacoustics> (date of assess 28.07.2020)
9. Лисютин В.А., Ластовенко О.Р., Ярошенко А.А. Сравнительная оценка вклада лучевых и волновых компонент при распространении импульсных сигналов в подводном звуковом канале Черного моря. *Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества*, 2018, т. 15, № 2, с. 74-85. [Lisyutin V.A., Lastovenko O.R., Yaroshenko A.A. The Comparative Evaluation of the Ray and Wave Components Contribution to the Impulse Signals Propagation of the Black Sea Underwater Sound Channel. *Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation*, 2018, vol. 15, no. 2, pp. 74-85. DOI: 10.31429/vestnik-15-2-74-85 (In Russ.)]
10. Лисютин В.А. Простая акустическая модель неконсолидированных морских осадков с внутренним и вязким трением. *Экологический вестник научных центров ЧЭС*, 2018, т. 15, № 3, с. 39-51. DOI: 10.31429/vestnik-15-3-39-51. [Lisyutin V.A. A Simple Acoustic Model of Unconsolidated Marine Sediments with Internal Friction and Viscous Dissipation. *Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation*, [e-journal] 2018, vol. 15, no. 3, pp. 39-51. DOI: 10.31429/vestnik-15-3-39-51. (In Russ.)]
11. Лисютин В.А. Обобщенная реологическая модель неконсолидированных морских осадков с внутренним трением и эффективной сжимаемостью. *Морской гидрофизический журнал*, 2019, т. 35, № 1, с. 85-100. DOI: 10.22449/0233-7584-2019-1-85-100. [Lisyutin V.A. Generalized Rheological Model of the Unconsolidated Marine Sediments with Internal Friction and Effective Compressibility. *Physical Oceanography* [e-journal], 2019, vol. 26, no. 1, pp. 77-91. DOI: 10.22449/1573-160X-2019-1-77-91. (In Russ.)]
12. Лисютин В.А., Ластовенко О.Р. Оценка влияния внутреннего и вязкого трения на дисперсию и затухание звука в неконсолидированных морских осадках. *Акустический журнал*, 2020, т. 66, № 4, с. 420-436. DOI: 10.31857/S0320791920040061. [Lisyutin V.A., Lastovenko O.R. Assessing The Influence of Internal and Viscous Friction on Dispersion and Sound Attenuation in Unconsolidated Marine Sediments. *Acoustical Physics*, 2020, vol. 66, no. 4, pp. 401-415. DOI: 10.1134/S1063771020040065. (In Russ.)]

FREQUENCY-TIME ANALYSIS OF UNDERWATER SOUNDS OF MARINE MAMMALS. TOOTHED WHALES

Lisyutin V.A., Lastovenko O.R., Degtyar A.D., Yaroshenko A.A., Petrenko N.V., Luchin V.L., Rybakova K.A., Papkov S.O.

Sevastopol State University

Universitetskaya Str., 33, Sevastopol, 299053, Russia; e-mail: vlisyutin@mail.ru

Abstract The study of underwater sounds emitted by toothed whales is in demand from the point of view of ecology, underwater navigation, and military applications. Mechanisms of radiation and reception of sounds by toothed whales are the most complex problems of bioacoustics. The study, analysis, and systematization of cetacean sounds can make it possible to identify the species and number of individuals. On the other hand, toothed whales are emitters of the highest frequency sounds with complex types of modulation. If the location of the source and receiver is known, time-frequency analysis of the sound field can be used to invert the acoustic properties of the waveguide. The paper provides an overview of the species of marine mammals – toothed whales and radiated types of high-frequency sounds. The results are presented in the form of time implementations and spectrograms. It is shown that waveguide conditions of sound propagation introduce specific dispersion distortions. There can be a big difference between the sound emitted and recorded using a hydrophone. The paper shows the principal possibility of using high-frequency mammalian sounds to solve problems of inversion of acoustic properties of a waveguide.

Key words: marine mammal sounds, time-frequency analysis, multipath propagation.