

ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОЙ АНАЛИЗ ПОДВОДНЫХ ЗВУКОВ МОРСКИХ МЛЕКОПИТАЮЩИХ. УСАТЫЕ КИТЫ

Лисютин В.А., Ластовенко О.Р., Дегтяр А.Д., Ярошенко А.А., Петренко Н.В., Лучин В.Л., Рыбакова К.А., Папков С.О.

Севастопольский государственный университет

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

Поступила в редакцию: 18.07.2020

Аннотация. Освоение шельфовых районов моря приводит к вмешательству человека в сложившиеся экосистемы и ставит под угрозу жизнь морских млекопитающих. Изучение, анализ и систематизация звуков китообразных может дать возможность идентификации вида и количества особей. С другой стороны, киты являются излучателями самых низкочастотных звуков в волноводе. Если известно расположение источника и приемника, частотно-временной анализ звукового поля может быть использован для инверсии акустических свойств морского дна. В работе приводится обзор видов морских млекопитающих – усатых китов и излучаемых типов высокочастотных и низкочастотных звуков. Проводится частотно-временной анализ излучаемых усатыми китами 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 низкочастотных звуков млекопитающих для решения задач инверсии акустических свойств морского дна.

Ключевые слова: звуки морских млекопитающих, дисперсия фазовой скорости, дисперсионные искажения, нормальные волны, частотно-временной анализ.

Введение.

Морские млекопитающие распространены по всем океанам и вносят значительный вклад в подводный звуковой фон [1]. Изучение подводных звуковых ландшафтов является растущей областью исследований, востребованной с точки зрения экологии, подводной навигации, военных применений [2].

Морские млекопитающие эволюционировали так, чтобы использовать звук в качестве основного сенсорного механизма как активного (излучение звука), так и пассивного (прием звука). Так сложилось потому, что звук распространяется под водой с меньшими потерями и на большие расстояния, чем свет. Морские млекопитающие производят звук для общения. Зубатые киты также издаю эхолокационные щелчки во время кормления и с целью навигации. В то время как вокализация морских млекопитающих производится гортанью, эхолокационные щелчки издаются расположенными в носовой полости воздушными мешочками [1].

Данная статья является обзорной, в значительной степени основанной на анализе открытых иностранных источников [1, 3]. Записи звуков взяты в основном с сайта [3].

Усатые Киты (Baleen Whales).

На рисунке 1 показаны китообразные: 1 – Южный кит (*Eubalaena australis*—**Southern Right Whale**); 2 – Карликовый южный кит (*Caperea marginata*—**Pygmy Right Whale**); 3 – Малый или остромордый полосатик (*Balaenoptera acutorostrata*—**Common Minke Whale**); 4 – Антарктический малый полосатик (*Balaenoptera bonaerensis*—**Antarctic Minke Whale, Dark-shoulder Minke Whale**); 5 – Сейвал (*Balaenoptera borealis*—**Sei Whale**); 6 – Полосатик Брайда (*Balaenoptera edeni*—**Bryde's Whale**); 7 – Синий кит (*Balaenoptera musculus*—**Blue Whale**); 8 – Полосатик Омуры (*Balaenoptera omurai*—**Omura's Whale**); 9 – Финвал – сельдяной кит (*Balaenoptera physalus*—**Fin Whale**); 10 – Горбатый кит (*Megaptera novaeangliae*—**Humpback Whale**).

Южный кит (*Eubalaena australis*—**Southern Right Whale**). Взрослые особи достигают длины от 11 до 18 метров и веса от 54 до 73 тонн. Тела очень широкие, в обхвате достигают 10 метров. Имеют 200-300 пластин китового уса с каждой стороны рта, длина которых составляет до 2 метров. Хвостовой плавник имеет размах до 7 метров. Спинной плавник отсутствует.

Карликовый южный кит (*Caperea marginata*—**Pygmy Right Whale**). Длина взрослой особи – 5,5-6,5 м, вес – от 3 до 3,5 тонн. Далеко от центральной части спины расположен спинной плавник. Имеет обтекаемую форму тела. По 230-260 пластин китового уса в каждом ряду и достигают до 70 см в длину. Размах хвостовых лопастей до 2 метров.

Малый или остромордый полосатик (*Balaenoptera acutorostrata*—**Common Minke Whale**). В длину достигают до 10 метров. Спинной плавник до 35 см высотой, с глубокой вырезкой по заднему краю, располагается ближе к хвостовой лопасти. Совершенно обтекаемое тело. Треугольная голова с 2 отчетливыми отверстиями дыхания и острой мордой. Китовый ус не выше 25 сантиметров, по 270-330 пластин в каждом ряду.

Антарктический малый полосатик (*Balaenoptera bonaerensis*—**Antarctic Minke Whale, Dark-shoulder Minke Whale**). Самки немного длиннее самцов и достигают 12 метров. Вес в среднем составляет 11 тонн. Спинной плавник имеет форму крючка и расположен примерно на две трети длины тела спереди. От 160 до 415 пар пластины китового уса имеют длину до 27 сантиметров.

Сейвал (*Balaenoptera borealis*—**Sei Whale**). Длина взрослой особи – 12-16 метров с весом 20-30 тонн. Пластины китового уса серо-черного цвета с более бледной бахромой, по 300-400 пар, высота пластин около 80 см. Спинной плавник серповидный, более высокий, чем у других полосатиков, расположение далеко за центром.

Полосатик Брайда (*Balaenoptera edeni* – **Bryde's Whale**). Тело полосатика вытянутое, длинное и гладкое. Длина до 15 метров, вес 20 тонн. Телосложением и окрасом полосатик Брайда напоминает сейвала, но в среднем на 1,2-1,5 м меньше его и стройнее. Основные отличия от сейвала – наличие на верхней части головы трех продольных гребней. Спинной плавник достигает в высоту лишь 2,0 - 2,4% длины тела, серпообразной формы, расположен далеко сзади. В одном ряду усовых пластин 250 - 280 высотой 20 - 25 сантиметров, не считая стержневидных образований в передней части ряда.

Синий кит (*Balaenoptera musculus*—**Blue Whale**). Наиболее крупный представитель отряда китообразных и всего класса млекопитающих. У синего кита язык весит 3 т, печень – 1 т, сердце – 600-700 кг, крови у него – 10 т, диаметр спинной артерии – 40 см, в желудке – 1-2 т пищи; пасть кита - комната площадью 24 м². Длина взрослого – 24-33 м (самки крупнее). Вес взрослого – 100-120 тонн. Пластины китового уса и бахрома смолянисто-черные, треугольные. Бахрома толстая, грубая – 40-45 мм. Высота не превышает 130 см, ширина 50-60 см, их число 270-440 в каждой половине верхней челюсти (в среднем 360).

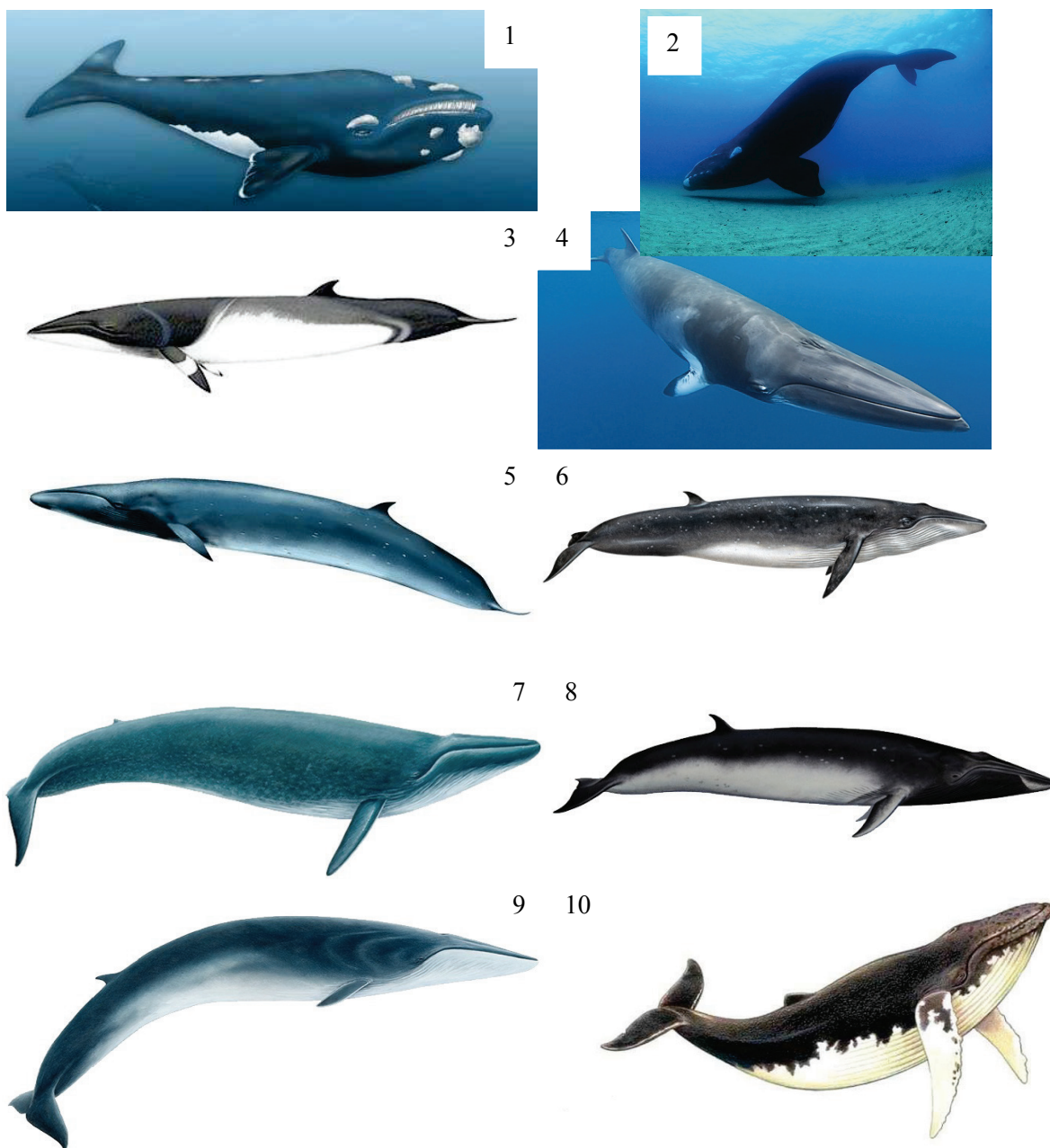


Рисунок 1. Усатые киты

Полосатик Омур (*Balaenoptera omurai*—**Omura’s Whale**). Этот подвид является одним из самых маленьких из полосатиков. Его длина достигает 10-11 метров. Внешне они очень напоминают полосатиков Брайда, однако отличаются от них четкими темными и светлыми отметинами на голове и челюсти. Выделен как самостоятельный вид только в 2003 году в результате молекулярно-генетических исследований.

Сельдяной кит (*Balaenoptera physalus*—**Fin Whale**). Тело стройное вытянутое, в передней части в сечении округлое. Голова маленькая (не более 25% от длины тела), вершина сглаженная. Финвал - второй по величине полосатик. Крупнейшие особи: в южном полушарии самки 27,3 м, самцы 24,4 м, а в северном — самки 24,6 м и самцы 23,8 м. Средняя длина южных самок (Антарктика) 21,0 м и самцов — 20 м, а северных — самок 19,4 м и самцов — 18,6 м. Вес взрослого - 30-80 тонн. Количество пластин китового уса в среднем 360 в каждом ряду, длиной до 90 см.

Горбатый кит (*Megaptera novaeangliae*—**Humpback Whale**). Один из самых энергичных среди больших китов, горбатый кит хорошо известен эффектными зрелищами выпрыгивания из воды, выставление хвоста и хлопанье плавниками. Он также один из наиболее легко определяемых китов. В среднем длина взрослой особи – 11,5-18 м, при весе 25-30 тонн. Тело утолщенное и короткое. Грудные плавники очень большие. Спинной плавник в виде горба, толстый, сравнительно низкий, задний край его крутой. В одном ряду китового уса 270-400 пластин, до 100 см.

Частотно-временной анализ звуков.

Южный кит (*Eubalaena australis*—**Southern Right Whale**). Все популяции издают частотно-модулированные звуки в диапазоне от 30 до 500 Гц, гармоники до 5 кГц и длительностью 0,2-3,8 с. Они также издают тональные звуки в диапазоне от 30 до 500 Гц и гармоники до 3,5 кГц, длительностью 0,2-6 с. Импульсные звуки длятся 0,2-6,3, с энергией, сосредоточенной в полосе частот от 30 Гц до 3 кГц. Наконец, Южные киты также излучают короткие широкополосные импульсы (30-8400 Гц), называемые "выстрелами" с уровнями источника 172-187 дБ и длительность 0,1-0,4 с [1].

Пример частотно модулированного звука показан на рисунке 2. Исходный звуковой файл имеет частоту дискретизации 12 кГц и записан со значительными шумами моря, для устранения которых он был подвергнут низкочастотной фильтрации. Звук с частотной модуляцией от 90 Гц до 200 Гц и плавно нарастающей амплитудой имеет длительность 2,5 с и воспринимается как «у – ууу» с нарастающей частотой. Второй тональный звук длительностью свыше 4 с слышится как утробный рев – урчание с переменной амплитудой. Высокая частота дискретизации обоих сигналов препятствуют их детальному частотному анализу.

Карликовый южный кит (*Caperea marginata*—**Pygmy Right Whale**). В настоящее время опубликована всего одна статья по вопросу акустики карликовых южных китов, описывающая частотно-модулированные звуки с частотой от 200 до 50 Гц, длительностью 0,3 с. Временная реализация звука показана на рисунке 3. Частота дискретизации при записи этого сигнала соответствует высококачественному звуковоспроизведению – 44100 Гц,

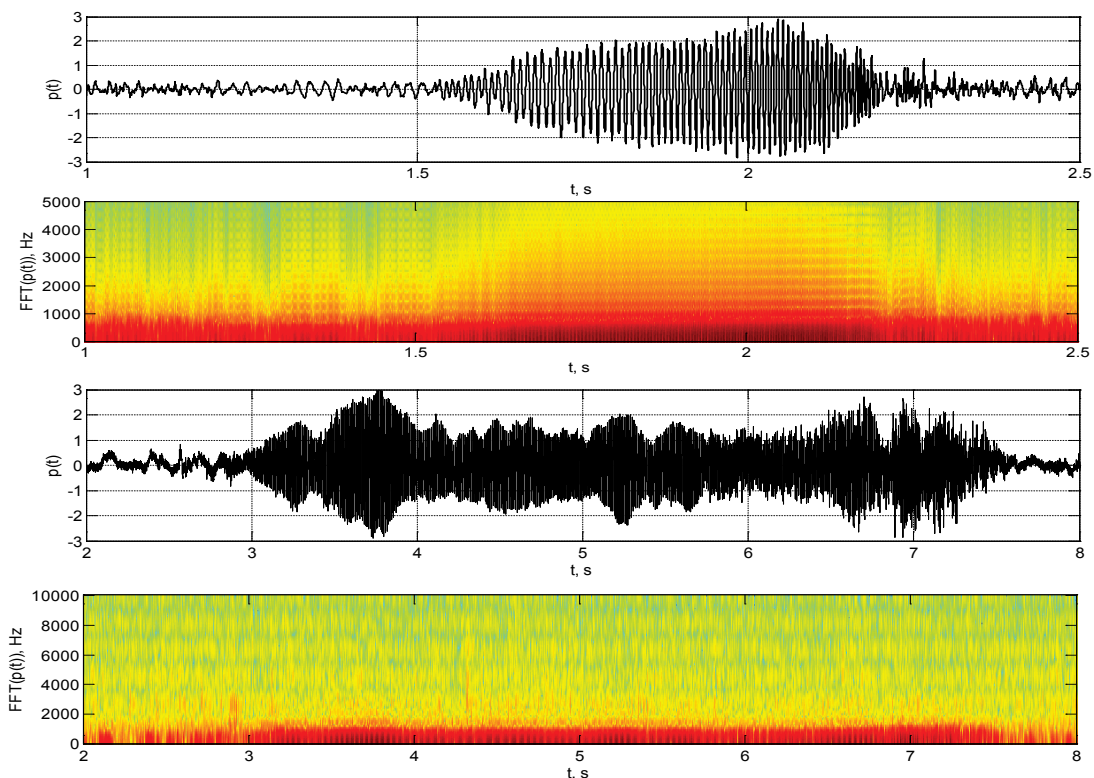


Рисунок 2. Частотно модулированный (верхняя панель) и тональный (нижняя панель) звуки южного кита

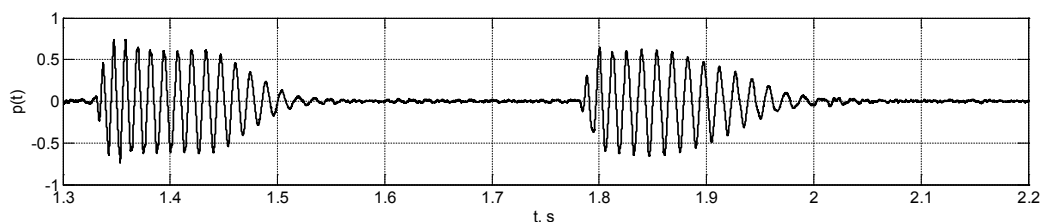


Рисунок 3. Реализация звука карликового южного кита

и поэтому спектрограмма имеет очень низкое разрешение по частоте и не приведена. Почти тональные короткие импульсы длительностью 0,2 с с частотой 71 Гц (определено по периоду на реализации) воспринимаются на слух как щипки демпфированной струны бас-гитары. Отметим, что нам совершенно неизвестны условия, в которых записаны приведенные сигналы. Как видно из рисунка 1, некоторые киты сфотографированы в условиях мелкого моря, видны песчаное дно и поверхность моря. Условия распространения звука в мелком море – особые. Мелкое море представляет собой волновод, ограниченный снизу дном, имеющим сложные акустические свойства, сверху – абсолютно отражающей свободной поверхностью. Вследствие многомодового характера распространения звука и внутримодовой дисперсии звуки, распространяющиеся в таком волноводе, искажаются [4-10].

Как следствие, зарегистрированный гидрофоном сигнал и исходный звук, излученный морским млекопитающим могут значительно отличаться.

Малый или остромордый полосатик (*Balaenoptera acutorostrata*—**Common Minke Whale**). В основном издают импульсные звуки, которые скомпонованы в каналы, которые имеют либо постоянный импульс частоты повторения, либо ускоряется, либо замедляется. Диапазон частот – 10-800 Гц. Импульсы имеют длительность 0,04-0,3 с; 1,5-4,5 импульса происходят в секунду, в каналах длительностью 10-70 с, и с исходными уровнями 159-176 дБ. Сообщалось, что остромордые полосатики издают звук «Боинг». «Боинг» - это амплитудно-модулированный звук, часто описываемый как последовательность быстрых импульсов, охватывает полосу частот 1-5 кГц, длится 1,4-4,2 с и показывает около 112-118 импульсов/с, на источнике уровень около 150 дБ. Временная реализация и спектрограмма звука «Боинг» показана на рисунке 4.

На слух этот звук удивительно напоминает вибрирующую металлическую линейку, наполовину прижатую одним концом к плоскости стола, а вторым концом – свободно свешивающуюся со стола. Как видно из реализации и спектрограммы, «металлические удары свободного конца линейки» - это импульсы с частотой 1 и 1,5 кГц, накладывающиеся на более низкочастотный рокот 300 Гц трения линейки о деревянный стол. В самом начале спектрограммы можно увидеть вступления модовых импульсов, возбужденных переходным процессом включения звукового сигнала.

Антарктический малый полосатик (*Balaenoptera bonaerensis*—**Antarctic Minke Whale, Dark-shoulder Minke Whale**). В Антарктиде частотно-модулированные звуки наблюдались с частотой 60-140 Гц, происходящие с гармониками и без них, с длительность $0,2 \pm 0,1$ с и громкостью $147,3 \pm 5,3$ дБ. Они также испускают быстрые широкополосные импульсы, звучащие как утиное кряканье (звук назван "bioduck"). В "bioduck" звук содержит 5-12 импульсов длительностью 0,1-0,4 с интервалом 1-3 с и громкостью $140,2 \pm 3,6$ дБ. Этот звук показан на рисунке 5.

С точки зрения слушателя, этот звук мало похож на кряканье, а скорее напоминает низкочастотное (200-100 Гц) «уханье». Отметим, что частотная модуляция может быть и не обязательно биологического происхождения. Спектрограмма этого звука удивительно совпадает со спектрограммой вступления мод, распространяющихся в волноводе мелкого моря, когда излучается шумоподобный импульс в узком диапазоне частот.

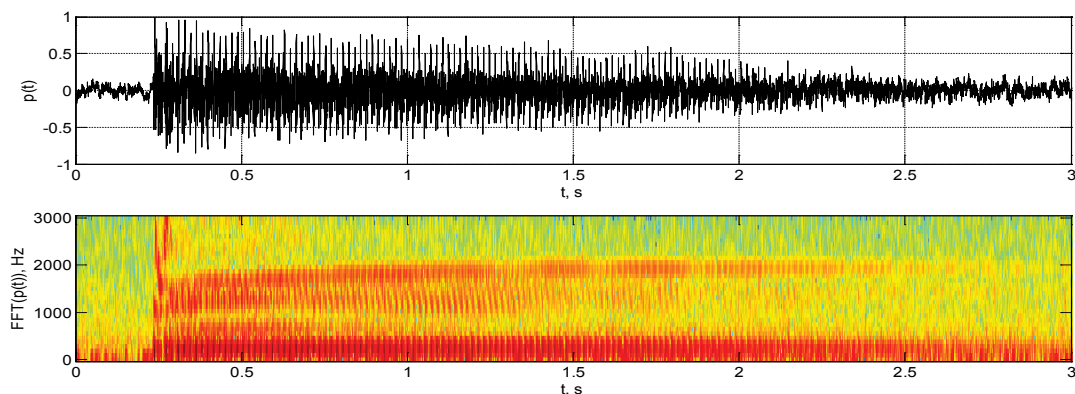


Рисунок 4. Звук «Боинг» остромордого полосатика

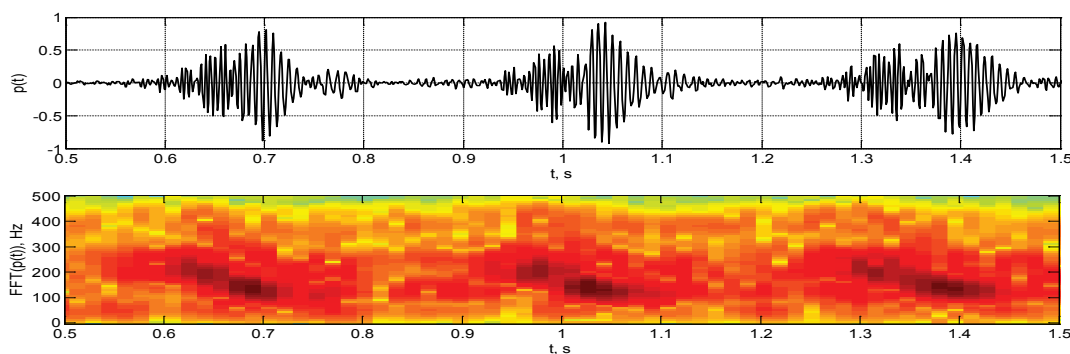


Рисунок 5. Кряканье антарктического малого полосатика

Сейвал (*Balaenoptera borealis*—**Sei Whale**). Сейвалы издают 0,5-2-с звуки с частотой 200-500Гц, без или с высокочастотными гармониками, в том числе многочастотные тональные звуки. Наиболее часто, встречающиеся сообщаемые звуки – это простые частотно модулированные звуки: восходящие и нисходящие, длящиеся 0,7-2,2 с, в низкочастотном диапазоне 20-220 Гц или среднечастотном диапазоне 200-600 Гц.

Полосатик Брайда (*Balaenoptera edeni* – **Bryde’s Whale**). Киты Брайда издают 0,3-7-с CW звуки при частоте 8-80 Гц с и без высоких гармоник. Они также издают частотно модулированные звуки, в основном нисходящие (50-1000 Гц, 0,1-5 с, 141-174 дБ) с гармониками и без них, иногда встречающимися в последовательностях 2-25 нисходящих волн. Киты также издают звуки, которые были описаны как "стоны" или быстрые серии импульсов с частотой 83-950 Гц, длительностью 0,3-51 с, 10-130 импульсов/с.

Синий кит (*Balaenoptera musculus*—**Blue Whale**). Могут издавать тональные, частотно модулированные или импульсные звуки, охватывающие полосу частот 14-300 Гц, от 0,9 до 4,4 с, гармониками до 100 Гц и громкостью 168-181 дБ. На рисунке 6 показана реализация крайне низкочастотного звука (не воспроизводится бытовой аппаратурой), продолжительностью $9,2 \pm 0,92$ с, производимых каждые 134-177 с. Похожие звуки с частотой 20-60 Гц, 12-15 с, повторяющиеся каждые 160-210 с часто регистрируются на северо-западном шельфе Австралии и одновременные визуальные наблюдения и фотографии подтвердили присутствие китов Омур.

Полосатик Омур (*Balaenoptera omurai*—**Omura’s Whale**). Низкочастотные (15-50 Гц) звуки со средней продолжительностью $9,2 \pm 0,92$ с, производимых каждые 134-177 с. Похожие звуки с частотой 20-60 Гц, 12-15 с, повторяющиеся каждые 160 - 210 с часто регистрируются на северо-западном шельфе Австралии и одновременные визуальные наблюдения и фотографии подтвердили присутствие китов Омур.

Сельдяной кит (*Balaenoptera physalus*—**Fin Whale**). Финвалы издают звуки, организованные в «песню», длящуюся в течение многих часов, состоящую из посылок с межимпульсным интервалом 5-26 с. Они также издают высокочастотные частотно модулированные звуки длительностью до 5 с, амплитудно модулированный «грохот» на частоте 10-30 Гц и продолжительностью до 30 с, амплитудно модулированные «стоны» до 100 Гц, длительностью 2 с и уровнем 159-183 дБ. Фрагмент песни представлен в виде реализации и спектрограммы на рисунке 7. При прослушивании звуки ощущаются как утробные «у» с неразборчивой модуляцией.

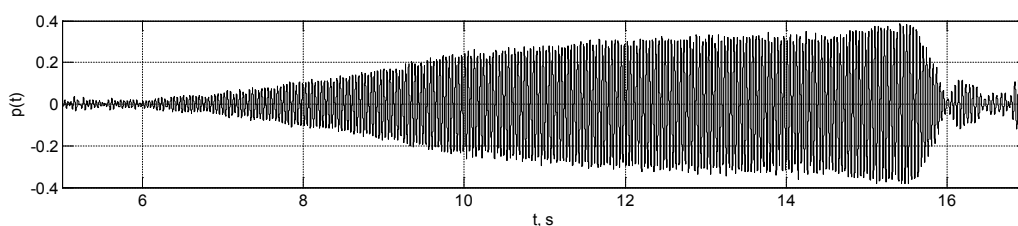


Рисунок 6. Рев синего кита

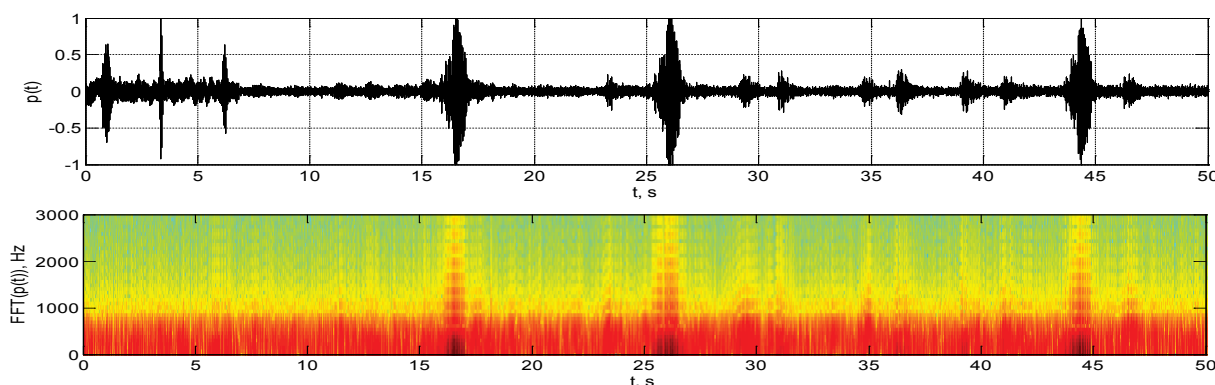


Рисунок 7. Песня финвала

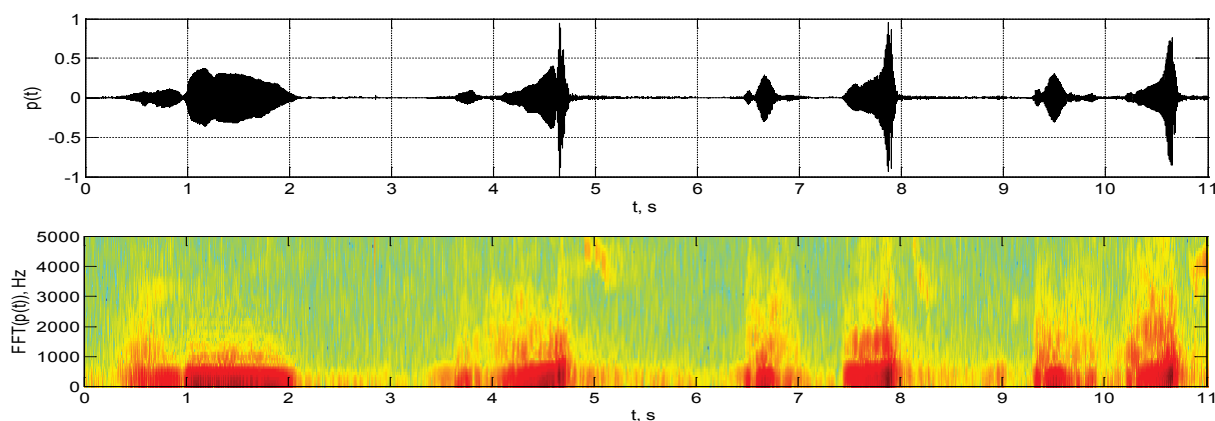


Рисунок 8. Песня горбатого кита

Горбатый кит (*Megaptera novaeangliae*—**Humpback Whale**). Песня состоит из 0,2-4 с блоков, сгруппированных в фразы, которые сгруппированы в темы. Полоса частот песни с обертонами может быть от 20 Гц до 24 кГц, громкостью 151-189 дБ. Громкость всех типов социальных звуков варьируются от 123 до 192 дБ. Песня горбатого кита показана на рисунке 8.

Субъективно песня воспринимается буквально как мычание коровы (низкочастотные компоненты на спектрограмме), смешанное с присвистами попугая (высокочастотные компоненты).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Освоение шельфовых районов моря приводит к вмешательству человека в сложившиеся экосистемы и ставит под угрозу жизнь морских млекопитающих. Изучение, анализ и систематизация звуков китообразных может дать возможность идентификации вида и количества особей [2]. С другой стороны, киты являются излучателями самых низкочастотных звуков в волноводе. Если известно расположение источника и приемника, частотно-временной анализ звукового поля может быть использован для инверсии акустических свойств морского дна [5, 9].

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. Григорьев В.А., Луньков А.А., Петников В.Г., Шатравин А.В. Оценка возможностей идентификации Гренландских китов на арктическом шельфе. *Акустический журнал*, 2019, т. 65, № 5, с. 596-607. [Grigoriev V.A., Lunikov A.A., Petnikov V.G., Shatravin A.V. Assessing the Possibilities of Identifying Bowhead Whales on the Arctic Shelf. *Acoustical Physics*, 2019, vol. 65, no 5, pp. 495-506. (In Russ.)]
3. <https://cmst.curtin.edu.au/research/marine-mammal-bioacoustics/> (date of assess 28.07.2020)
4. Лисютин В.А. Простая акустическая модель неконсолидированных морских осадков с внутренним 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*, 2018, vol. 15 (3), pp. 39-51. DOI: 10.31429/vestnik-15-3-39-51. (In Russ.)]
5. 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 (1), pp. 77-91. DOI: 10.22449/1573-160X-2019-1-77-91. (In Russ.)]
6. Katsnelson B., Petnikov V., Lynch J. *Fundamentals of Shallow Water Acoustics*. New York: Springer, 2012, 540 p. (Underwater Acoustics. Eds. J.A. Simmen et al.). DOI: 10.22449/0233-7584-2016-1-62-72.
7. Wan L., Badiy M., Knobles D.P. Geoacoustic inversion using low frequency broadband measurements from L-shaped arrays in the Shallow Water 2006 Experiment. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2016, vol. 140, no. 4, pp. 2358-2373.
8. Thode A., Bonnel J., Thieury M., Fagan A., Verlinden C. et al. Using nonlinear time warping to estimate North Pacific right whale calling depths. in the Bering Sea. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2017, vol. 141, no. 5, pp. 3059-3069.

9. 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.)]

10. Лисютин В.А., Ластовенко О.Р., Ярошенко А.А. Комплексное применение лучевого и волнового подходов к расчетам звуковых полей в условиях узкого волновода на шельфе Черного моря. *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*, 2020, № 1, с. 91-102. [Lisyutin V.A., Lastovenko O.R., Yaroshenko A.A. Kompleksnoye primeneniye lucheвого i volnovogo podkhodov k raschetam zvukovykh poley v usloviyakh uzкого volnovoda na shel'fe Chernogo morya. *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoy i shel'fovoy zon morya*, 2020, no. 1, pp. 91-102. (In Russ.)]

FREQUENCY-TIME ANALYSIS OF UNDERWATER SOUNDS OF MARINE MAMMALS. BALEEN WHALE

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 development of offshore areas of the sea leads to human intervention in the existing ecosystems and threatens the life of marine mammals. The study, analysis, and systematization of cetacean sounds can make it possible to identify the species and number of individuals. On the other hand, whales are the emitters of the lowest frequency sounds in the waveguide. 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 sea floor. The paper provides an overview of the species of marine mammals – baleen whales and radiated types of high-frequency and low-frequency sounds. The frequency-time analysis of sounds emitted by baleen whales is performed. 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 low-frequency mammalian sounds to solve problems of inversion of acoustic properties of the sea floor.

Key words: *marine mammal sounds, phase velocity dispersion, dispersion distortions, normal modes, time-frequency analysis.*