

## НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ОТРАЖЕНИЯ ЧМ-СИГНАЛОВ (СВИСТОВ) ДЕЛЬФИНОВ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ БАССЕЙНЕ

© 2019 г. В. А. Рябов\*

Карадагская научная станция им. Т.И. Вяземского – природный заповедник РАН,  
ул. Науки 24, п. Курортное, Феодосия, Крым, 298188 Россия

\*e-mail: ryaboff@inbox.ru

Поступила в редакцию 12.10.2018 г.

После доработки 14.06.2019 г.

Принята к публикации 09.07.2019 г.

Впервые для зубатых китов записаны отражения ЧМ-сигналов (свистов) двух черноморских дельфинов афалин (*Tursiops truncatus*) от границ бассейна с размерами во много раз меньше протяженности сигналов в пространстве. Показано, что дельфины продуцируют “свисты” с уровнями звукового давления (около 2 Па), лишь незначительно (на 3–8 дБ) превышающими амплитуды акустических шумов бассейна. Установлено, что при распространении ЧМ-сигналы многократно отражаются от границ бассейна, форма излученного сигнала искажается в результате интерференции с сигналами, отраженными от границ бассейна и акустическими шумами. В отличие от временной области, спектр ЧМ-сигнала более устойчив к влиянию интерференции и поэтому отношение сигнал/шум спектральных плотностей мощности (СПМ) этих же сигналов и их отражений достигает 30–40 дБ. Полученные результаты указывают на преимущества анализа ЧМ-сигналов и их эха в спектральной области.

*Ключевые слова:* дельфин, ЧМ-сигнал (свист), эхо, согласованный фильтр, ЧМ-сонар

**DOI:** 10.1134/S0320791919060133

### ВВЕДЕНИЕ

Акустические сигналы зубатых китов разнообразны и являются основным средством, необходимым им для осуществления сложного согласованного социального поведения [1]. Следует специально отметить, что в условиях недостаточной видимости эти сигналы становятся единственным сенсорным посредником животных. Однако, в научной литературе акустические сигналы животных описываются качественно – “щелчки, жужжание, скрип, крики, хлопки, лай, визг, свист” и т.д. [2–4] и др.

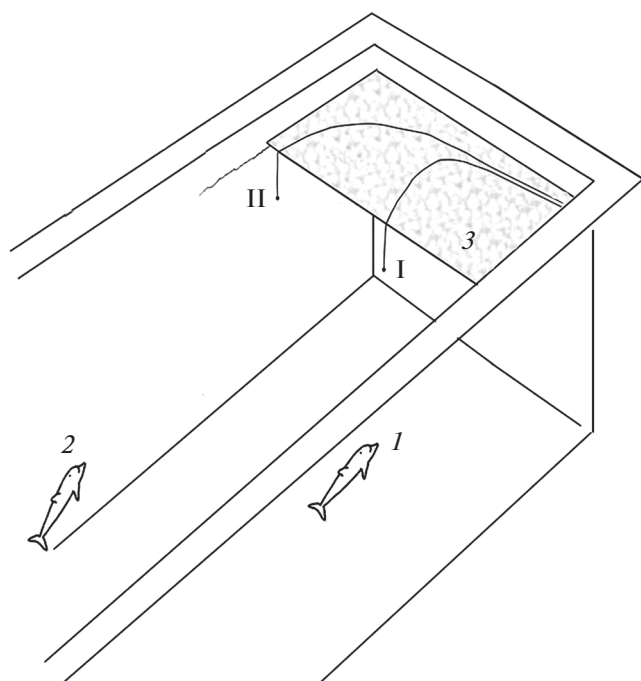
До настоящего времени общепринято мнение, что у Odontoceti есть только один сонар. Зондирующие сигналы сонара – “щелчки”, или ультракороткие сверхширокополосные импульсы [5–7]. Эхолокационные “щелчки” бутылконосых дельфинов очень короткие, длительностью около 50 мкс, поэтому широкополосные и охватывают частоты 2–200 кГц с максимумом энергии на частотах около 120–130 кГц [8–10].

В то же время, были высказаны предположения о том, что ЧМ-сигналы (известные как “свисты”) дельфины могут использовать: в различных поведенческих контекстах [11, 12], для идентификации себя “свистами-автографами” [13, 14], при

определении направления движения “свистящего” дельфина [15], для поддержания акустического контакта между отдельными рассеянными особями в пространстве [16–21] на расстояниях до 10.5–25 км [17, 21].

ЧМ-сигналы зубатых китов изучаются с середины прошлого века, однако в большинстве работ регистрация сигналов выполнена в полосе частот только до 20 кГц. Характеристики сигналов и их функциональность не рассмотрены в свете теории сигналов и эхолокации. Эти недостатки в некоторой степени были восполнены в работах [5, 6], где они рассматриваются как многочастотные ЧМ-сигналы. У афалины эти сигналы охватывают область частот до 140 кГц, произведение длительности сигнала на ширину его спектра достигает  $10^4$ – $10^5$ . Результаты этих работ дают основания полагать, что “свисты” являются зондирующими сигналами ЧМ-доплеровского сонара и ЧМ-сонара со сжатием импульса, или CHIRP (compressed high intensity radiated pulse) сонара дельфинов.

Цель работы – изучение некоторых аспектов отражения ЧМ-сигналов черноморских дельфинов вида афалина (*Tursiops truncatus*) в условиях



**Рис. 1.** Конфигурация эксперимента. I и II – гидрофоны I и II каналов записи, соответственно. 1 и 2 – дельфины, 3 – мостки. Ширина мостков – 3 м. Расстояние между гидрофонами – 5 м. Глубина гидрофонов – 1 м. Уровень воды – 4 м. Расстояние гидрофона II от стенки бассейна – 0.35 м.

бассейна с размерами намного меньшими протяженности сигналов в пространстве.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### Метод

Акустические сигналы двух взрослых черноморских дельфинов (*Tursiops truncatus*) с кличками “Яша” (самец) и “Яна” (самка) были записаны в закрытом бетонном бассейне размерах 27.5 × 9 × 4.5 м, ФГБУН “Карадагская научная станция им. Т.И. Вяземского – природный заповедник РАН”. Дельфины находятся в бассейне около 25 лет и имеют нормальный слух. Сигналы регистрировались двухканальной системой записи (рис. 1). Расстояние между гидрофонами I и II каналов записи было выбрано 5 м, для получения достаточных межканальных различий уровней звукового давления (УЗД) и временных задержек каждого сигнала. Принадлежность записанных сигналов конкретным дельфинам установлена с учетом межканальных различий временных задержек и межканальных различий УЗД каждого сигнала, а также с учетом расстояний между дельфинами, гидрофонами и границами бассейна. Глубина погружения гидрофонов – 1 м. Гидрофон I канала был расположен ближе к середине бассейна (рис. 1, I), гидрофон II канала (рис. 1, II)

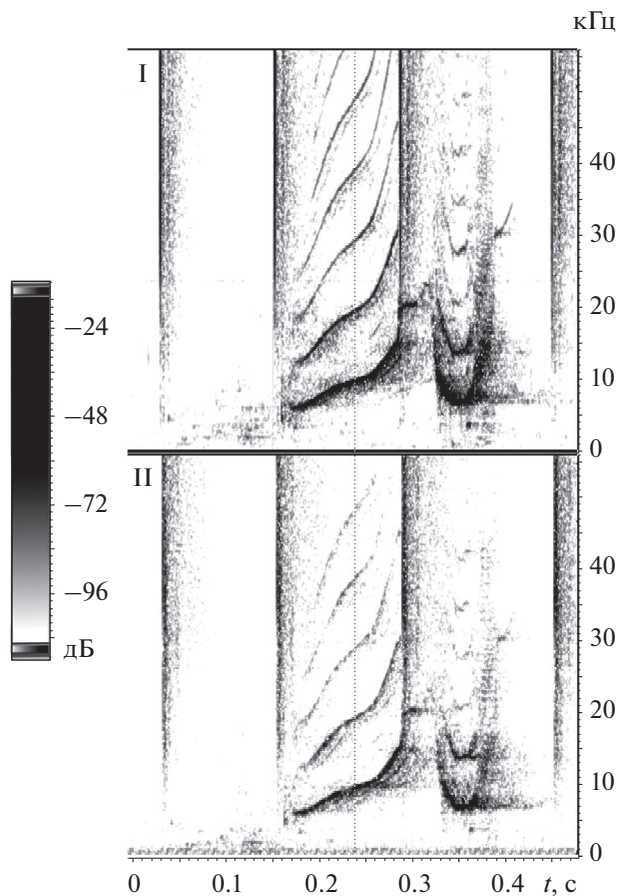
находился близко у стенки бассейна. В некоторых случаях положение дельфинов в бассейне относительно гидрофонов регистрировала кинокамера, синхронно с записью сигналов.

Гидрофоны (I и II) – сферические, диаметром 14 мм, изготовлены из пьезокерамики, имеют калиброванную чувствительность –203.5 и –206 дБ относительно 1 В/мкПа, или 66.5 и 50 мкВ/Па, соответственно. Частотная характеристика гидрофонов имела неравномерность ±3 дБ до частот около 160 кГц и ±10 дБ до частот около 220 кГц. Каждый канал записи сигналов состоял из гидрофона, фильтра верхних частот (0.1 кГц), усилителя напряжения (40 дБ) и одного из каналов многоканального 14-разрядного аналого-цифрового преобразователя (АЦП) USB-3000. Динамический диапазон АЦП и тракта регистрации сигналов около 81 дБ (0.1–1600 Па), частота дискретизации каждого канала АЦП – 1 МГц. Оцифрованные сигналы дельфинов с АЦП записаны на жесткий диск ноутбука. Пакеты программ PowerGraph 3.3.8 и Adobe Audition 3.0 были использованы для записи, визуализации и обработки сигналов. Спектральные плотности мощности (СПМ) ЧМ-сигналов дельфинов во времени (спектрограммы) были рассчитаны с использованием быстрого преобразования Фурье на 4096 точек.

Эксперимент выполнялся без специальной дрессировки и без пищевого подкрепления дельфинов, в дневное время. Дельфины продуцировали акустические сигналы, свободно передвигаясь по бассейну, по-видимому, не подозревая, что их записывают. Всего было сделано 20 записей акустических сигналов дельфинов, одна запись в день, длительность каждой записи около 30 мин. Всего было записано несколько тысяч акустических сигналов дельфинов, пяти различных классов, в соответствии с работой [6]. ЧМ-сигналы были выбраны для анализа и обсуждения. Во время записи акустических сигналов дельфинов других животных в бассейне не было.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Среди записанных акустических сигналов было около трехсот ЧМ-сигналов дельфинов. УЗД свистов обычно не превышал 2–3 Па, в редких случаях до 10 Па. Основная частота записанных ЧМ-сигналов изменялась от 3.5 до 42 кГц. Число гармоник могло составлять от единиц до нескольких десятков. Полоса частот ЧМ-сигналов вместе с гармониками могла составлять от 15 до 140 кГц. Спектрограммы ЧМ-сигналов описывали линейно или нелинейно возрастающие, или убывающие по частоте кривые разной крутизны, и их комбинации с повторениями. Эти кривые принято называть контуром свиста. В целом, формы контуров ЧМ-сигналов, как и основные частоты и соответственно частоты и количество гармоник

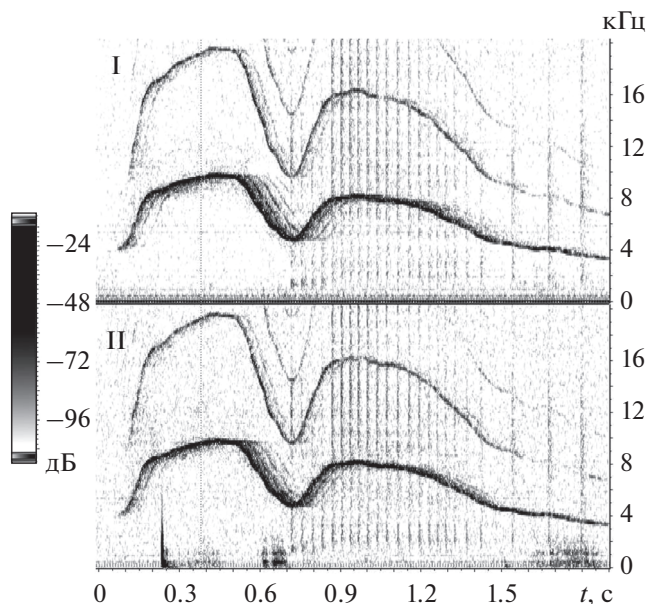


**Рис. 2.** ЧМ-сигнал и четыре “щелчка”, продуцированные дельфином Яша (спектрограмма). Расстояние от дельфина до гидрофона (I канала) 2–3 м. I и II – гидрофоны первого и второго каналов записи сигналов соответственно.

сигналов, а также их длительность, согласуются с представленными в работах [3, 13–18, 21–23].

Кроме того, были зарегистрированы широкополосные шумоподобные ЧМ-сигналы с числом гармоник более 50 и максимальным УЗД около 10 Па (приведенные к 1 м от дельфина). Эти сигналы имеют достаточный уровень энергии в области звуковых частот, поэтому при воспроизведении человек хорошо слышит их как шумовые импульсы [6].

При визуальном анализе спектрограмм записанных ЧМ-сигналов дельфинов обнаружено их многократное эхо (рис. 2–4). Отражения повторяют форму контуров изменения основной частоты и гармоник ЧМ-сигналов, с различной временной задержкой относительно них (табл. 1). Задержка каждого последующего эха в целое число раз кратна задержке между соответствующим сигналом и первым эхо. В качестве примера на рис. 2 показан ЧМ-сигнал, продуцированный на ходу дельфином Яша вблизи (около 2–3 м) гидро-

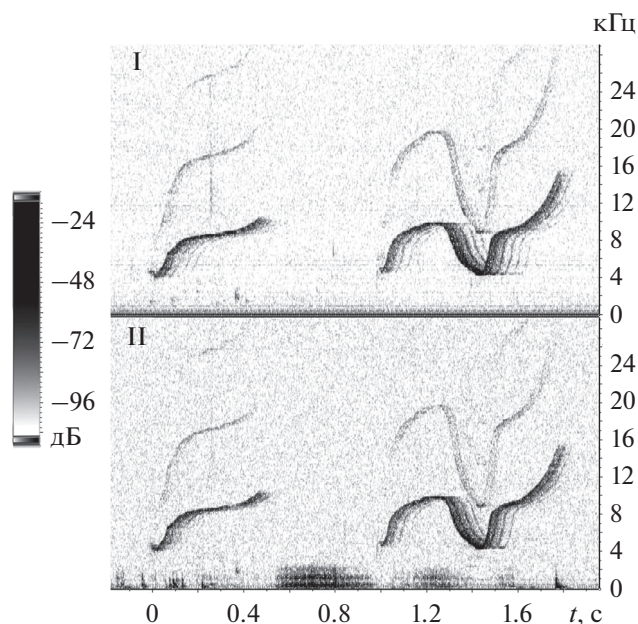


**Рис. 3.** ЧМ-сигнал и “щелчки”, продуцированные дельфином Яна (спектрограмма). Расстояние от дельфина до гидрофонов около 12–15 м. I и II – гидрофоны первого и второго каналов записи сигналов соответственно.

фона I канала (обозначено 1 на рис. 1). Временные задержки между отражениями сигнала составляют около 9–12 мс (рис. 2, табл. 1). В этом случае уровень СПМ ЧМ-сигнала на I канале приблизительно на 20 дБ больше, чем на II канале. Число гармоник сигнала на I канале семь, на II канале – четыре. Полоса частот этого ЧМ-сигнала с гармониками около 119 кГц. На рис. 2 показана только область спектрограммы, содержащая эхо ЧМ-сигнала. Таблица учитывает только гармоники, относительно которых измерены временные задержки эхо.

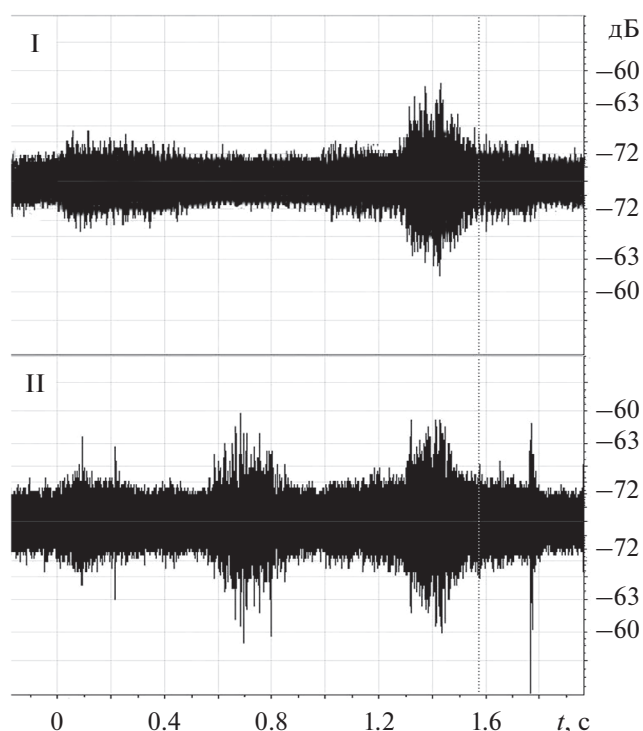
На рис. 3 в качестве примера показана спектрограмма ЧМ-сигнала Яны, который она продуцировала в движении с расстояния до гидрофонов около 12–15 м, как приблизительно обозначено 2 на рис. 1. В этом случае в области основной частоты спектрограммы сигнала, на I канале записи зарегистрированы четыре эха (табл. 1) с временной задержкой относительно основной частоты около 36 мс (первое эхо), 72 мс (второе эхо), 108 мс (третье эхо) и 144 мс (четвертое эхо). На втором канале зарегистрированы четыре эха с задержками, кратными около 31 мс. Задержка между эхами в целое число раз кратна задержке между основной частотой сигнала и первым эхо. В области первой гармоники свиста также зафиксировано ее отражение. Межканальных различий уровней СПМ сигнала не заметно.

На рис. 4 показан пример спектрограммы двух ЧМ-сигналов, продуцированных на ходу Яной с



**Рис. 4.** Два ЧМ-сигнала, продуцированные Яной (спектрограмма). Расстояние от дельфина до гидрофонов около 18–21 м. I и II – гидрофоны первого и второго каналов записи сигналов соответственно.

максимально возможного в нашем бассейне расстояния до гидрофонов, около 18–21 м. В области основной частоты и первых гармоник сигналов зарегистрировано различное количество эхо с различной временной задержкой (табл. 1). Межканальных различий уровней СПМ сигналов не заметно. Анализ записей акустических сигналов показал, что в частотной области ЧМ-сигналы дельфинов не имеют деформаций в результате интерференции с их отражениями. Более того, СПМ ЧМ-сигналов значительно больше (на 30–40 дБ) СПМ акустических шумов бассейна (рис. 2–4). В отличие от этого, во временной об-



**Рис. 5.** ЧМ-сигналы, показанные на рис. 4 (временная область). Ось абсцисс – время  $t$ , с. Ось ординат – уровень звукового давления в дБ относительно 1000 Па. I и II – гидрофоны первого и второго каналов записи сигналов соответственно.

ласти эти же ЧМ-сигналы (рис. 4, 5) с трудом отличимы от акустических шумов бассейна. Амплитуда УЗД шума на I и II каналах составляет около –72 и –70 дБ относительно 1000 Па (рис. 5) соответственно. Амплитуда УЗД первого и второго ЧМ-сигнала превышает амплитуду УЗД шума на 3–5 дБ и около 8 дБ соответственно. Максимальные значения УЗД в начале и конце этих ЧМ-сигналов практически совпадают с максимальными уровнями

**Таблица 1.** Основные характеристики эхо ЧМ-сигналов дельфинов

Расстояние от дельфина до гидрофонов, м	2–3		12–15		18–21			
	I	II	I	II	I		II	
Канал регистрации					первый ЧМ-сигнал		второй ЧМ-сигнал	
Число эхо основной частоты	1	3	4	4	4	2	5	3
Задержки эха основной частоты, мс	$12.8 \pm 0.21$	$12.11 \pm 0.19$	$35.95 \pm 0.35$	$31 \pm 1.3$	$35.23 \pm 1.05$		$35.62 \pm 0.65$	$34.7 \pm 1.25$
Число гармоник ЧМ-сигнала	5	3	1	1			1	1
Задержки эха гармоник, мс	$9.02 \pm 0.32$	$12.18 \pm 0.016$	$36 \pm 0.35$	$36 \pm 0.41$			$31.2 \pm 0.65$	$33.94 \pm 1.85$

окружающего акустического шума бассейна и только ближе к середине сигналов их УЗД достигают максимальных значений, превышающих уровень шумов на 3–8 дБ. Отражения ЧМ-сигналов во временной области визуально не обнаружены.

### ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящей работе отражения ЧМ-сигналов дельфинов зарегистрированы впервые для зубатых китов. Неожиданным также оказался тот факт, что эхосигналы четко видны в бассейне, размеры которого намного меньше протяженности сигналов в пространстве. Учитывая эти наиболее интересные результаты работы, обсудим некоторые аспекты отражения ЧМ-сигналов дельфинов в бассейне и возможности их анализа.

Учитывая, что длина бассейна около 27.5 м, а ширина в области расположения гидрофонов — около 9 м и скорость звука около 1500 м/с, время двойного пути звука между дальними стенками бассейна составит около 36 мс, и между боковыми стенками в области гидрофонов — около 12 мс.

Эхо ЧМ-сигналов дельфинов с различными временными задержками, меньшими 30 мс, по-видимому, представляют собой суперпозицию многочисленных эхо, которые видны на этих рисунках как утолщение линии контура сигнала и ее расширение, с разным уровнем серого (рис. 2–4). В этой области временных задержек, по-видимому, сосредоточено максимальное число однократных отражений ЧМ-сигналов и их гармоник, среди которых эхо от поверхности воды, дна и стенок бассейна. Эхо с большими временными задержками, очевидно, представляют собой многократные отражения ЧМ-сигналов от границ бассейна, при их распространении вдоль или поперек бассейна. Следовательно, задержки эхо, близкие к 36 и 12 мс (табл. 1), указывают на то, что эхосигнал проходит двойной путь вдоль или поперек бассейна, соответственно, каждый раз фиксируясь гидрофонами обоих каналов.

Анализ записей указывает также на то, что с увеличением расстояния (рис. 2–4) число наиболее высокочастотных гармоник и межканальная разница СПМ ЧМ-сигналов уменьшаются. Эти факты указывают на большую степень затухания высокочастотных составляющих ЧМ-сигналов и их направленность.

На рис. 4, 5 в качестве примера показаны одни и те же ЧМ-сигналы в частотной (спектрограмма) и временной области. Максимальные амплитуды УЗД этих сигналов достигают только 0.25–0.5 Па и лишь незначительно превышают УЗД акустических шумов бассейна. Протяженность рассматриваемых ЧМ-сигналов в пространстве (учитывая их длительность  $t_w = 0.5–1.8$  с и скорость звука в воде  $c_0 \approx 1500$  м/с) составляет около  $L_w \approx t_w c_0 \approx$

$\approx 750–2700$  м, что в десятки раз больше размеров экспериментального бассейна. ЧМ-сигналы дельфинов имеют низкие уровни звукового давления, близкие к уровню шумов бассейна (рис. 5). Распространяясь в бассейне, они многократно отражаются от границ бассейна и интерферируют со своими отражениями. Известно, что форма сигналов вследствие многократной суперпозиции с эхо значительно деформируется во временной области. Вместе с тем, их эхо существенно маскируется протяженными ЧМ-сигналами, имеющими больший уровень, и акустическими шумами бассейна, что значительно затрудняет анализ эхосигналов во временной области.

В отличие от этого, как следует из результатов настоящей работы, в частотной области ЧМ-сигналы не имеют деформаций в результате интерференции с отражениями. Маскировка отражений сигналами отсутствует и СПМ ЧМ-сигналов и их отражений значительно больше (на 30–40 дБ) СПМ акустических шумов бассейна (рис. 2–4). Более того, ЧМ-сигналы имеют длительность на три–четыре порядка большую длительности импульсных сигналов дельфина, что обеспечивает им относительно большую энергию, это подтверждается их значительным пробегом и многократными отражениями в бассейне (рис. 2–4). Учитывая результаты настоящей работы, можно полагать, что дельфины анализируют ЧМ-сигналы и их эхо в частотной области. В пользу этого также свидетельствует низкий уровень сигналов, соизмеримый с уровнем шума во временной области. Если предположить, что дельфин анализирует эхо ЧМ-сигналов, то возникает вопрос — какой механизм анализа может использовать для этого дельфин? В данном случае представляет интерес анализ временных задержек отражений ЧМ-сигналов. Для ответа на этот вопрос рассмотрим ЧМ-сигналы (свисты) в свете теории и техники сложных сигналов.

Акустические сигналы с произведением длительности на ширину спектра  $TW \gg 1$  называют сложными, или шумоподобными, а также сигналами с расширенным спектром. Большая величина  $TW$ , где  $T$  — средняя длительность “свиста”,  $W$  — средняя ширина его спектра, означает сложную структуру и большое информационное содержание сигналов, тогда как малая величина этого произведения характеризует простые сигналы. Произведение  $TW$  ЧМ-сигнала дельфина, при учете только девиации основной частоты сигнала достигает 10251, а с учетом гармоник сигнала — около 49000, и еще больше у шумоподобных “свистов” — около 108000 [6]. Сложные акустические сигналы дельфина в процессе эволюции развивались и совершенствовались на протяжении десятков млн лет вместе с его эхолокационной системой и слухом. Следовательно, оптимальная эффективность этих систем определяется физи-

ческими характеристиками сигналов и методами их обработки дельфином [6]. Преимущества, полученные эхолокационной системой дельфина от использования сложных сигналов и соответствующих им методов обработки, можно объяснить, исходя из известных концепций теории сложных сигналов.

Для оптимального приема эхосигналов на фоне шума в технике эхолокации используют согласованную фильтрацию или оптимальный корреляционный прием. В этом случае современные эхолокационные системы со сложными сигналами получают повышенную помехоустойчивость, которая определяется известным соотношением

$$q^2 = 2TW\rho^2, \quad (1)$$

где  $\rho^2 = P_c/P_n$  — отношение мощностей сигнал/помеха на входе приемника,  $q^2 = 2E/N_n$  — отношение сигнал/помеха на выходе согласованного фильтра или корреляционного приемника, где  $E$  — энергия сигнала,  $N_n$  — спектральная плотность мощности помехи в полосе частот сигнала. Для этого достаточно выбрать сложный сигнал с достаточным произведением  $TW$  (1). Прием сложных сигналов согласованным фильтром или корреляционным приемником усиливает сигналы в  $2TW$  раз. Величину  $K = q^2/\rho^2$  называют коэффициентом усиления сложного сигнала при обработке. Соотношение (1) является фундаментальным в теории систем связи со сложными сигналами. Вместе с тем, сложные сигналы используются в эхолокаторах при одновременном измерении дальности цели  $R$  и доплеровского сдвига эхосигнала  $f_d$ .

Точность измерения и разрешающая способность эхолокатора по дальности  $R$  возрастает с расширением полосы частот сложного сигнала и с возрастанием отношения сигнал/помеха  $q^2$ . Чем больше  $q^2$  и длительность сигнала  $T$ , тем выше точность измерения и разрешающая способность определения относительной радиальной скорости  $V_r$ .

У сложных сигналов можно независимо изменять ширину спектра  $W$  и длительность  $T$ , при совместном измерении дальности  $R$  и относительной радиальной скорости цели  $V_r$ . Другими словами, форма контура свиста может быть различной, необходимо лишь, чтобы она соответствовала амплитудно-частотной и фазово-частотной характеристикам согласованного фильтра слуха для решения соответствующей эхолокационной задачи. Поэтому при анализе свистов обычным слухом различную форму контура свиста дельфины могут использовать в контексте задач, рассмотренных в работах [11–21]: как контекстно-специфические сигналы, свисты-автографы, для определения ориентации и направления движения сигнализирующего дельфина, а также для

установления акустического контакта, координации действий и поддержания сплоченности между рассеянными животными в группе.

При обработке сложного сигнала согласованным фильтром происходит сжатие сигнала во времени и его усиление вследствие синфазного сложения составляющих сигнала, поэтому можно обойтись без усилителя мощности сигнала. Важно, что сжатие импульса позволяет использовать относительно большую энергию длинного импульса с временным разрешением как у короткого импульса. Отклик согласованного фильтра для ЧМ-сигнала длительностью  $T$  и шириной спектра  $W$  представляет собой узкий импульс или центральный пик и боковые импульсы или боковые пики. Амплитуда центрального пика  $V$ , его длительность  $\tau_0 \approx 1/W$ . Амплитуда боковых импульсов  $v_{\max}$ . Чем шире спектр сложного сигнала, тем короче длительность центрального пика. Сложные сигналы с большим произведением  $TW$  обладают свойствами, которые записываются следующим образом:

$$T/\tau_0 \approx TW, \quad (2)$$

$$V/v_{\max} \approx (\alpha TW)^{1/2}, \quad (3)$$

где  $\alpha$  — некоторая постоянная, зависящая от  $TW$ .

Соотношение (2) определяет сжатие сложных сигналов — отношение длительности сигнала к длительности центрального пика. Сжатие приблизительно равно произведению  $TW$  сложного сигнала.

Соотношение (3) характеризует подавление боковых пиков. Чем больше  $TW$  сложного сигнала, тем больше подавление боковых пиков. Чем уже центральный пик АКФ зондирующего сигнала сонара, тем выше разрешающая способность сонара по времени — доплеровскому смещению и точности измерения дальности цели и радиальной скорости.

Отметим, что согласованный фильтр и корреляционный приемник эквивалентны с точки зрения обнаружения сигнала. Однако коррелятор является устройством с переменными во времени параметрами и может гибко подстраиваться под изменяющийся сигнал (как активный фильтр), тогда как согласованный фильтр настроен на один определенный сигнал. Тем не менее, вопрос о применении каждого устройства определяется в зависимости от простоты реализации.

Каким же образом может быть организован согласованный фильтр в слухе дельфина? Этот вопрос не простой и, очевидно, потребует дальнейших исследований. Однако можно предположить, что каждый раз при продуцировании ЧМ-сигнала (свиста) слух дельфина организует согласованный с конкретным сигналом фильтр слуха, с соответствующими амплитудно-частотной и фазо-частот-

ной характеристиками. Поэтому все отражения сигнала, как зондирующего сигнала сонара дельфина со сжатием импульса или ЧМ-доплеровского сонара, будут фиксироваться на выходе этого фильтра в виде отдельных откликов, с разной временной задержкой (определяемой дальностью отражателей, и их относительной радиальной скоростью). Временное разрешение между откликами определяется произведением  $TW$  ЧМ-сигнала. Важно, что в этом случае существенно повышается помехозащищенность этих сонаров. Каждый дельфин может продуцировать различные типы своих сигналов одновременно в совместной полосе частот [6]. В этих условиях возникают значительные перекрестные помехи (как между сигналами одного дельфина, так и сигналами сородичей), поэтому анализ согласованным фильтром слуха является оптимальным средством борьбы с перекрестной помехой и другими помехами, некоррелированными с сигналом. При этом эхолокационная система дельфина будет утилизировать рассмотренные выше преимущества использования сложных сигналов.

Исходя из характеристик рассмотренных выше ЧМ-сигналов наших дельфинов, при  $TW = 10^4 - 10^5$  коэффициент усиления сложного сигнала при обработке, исходя из (1),  $K = q^2/\rho^2 = 2TW \approx 10^4 - 10^5$ . При этом сигнал длительностью  $T$  (в нашем случае  $T \approx 0.5 - 1.8$  с) сожмется до длительности отклика согласованного фильтра слуха и, исходя из (2), будет составлять  $\tau_0 \approx T/TW \approx (0.5 - 1.8)/(10^4 - 10^5) \approx 18 - 50$  мкс. Отношение амплитуды центрального пика отклика  $V$  согласованного фильтра к амплитуде боковых импульсов отклика  $v_{\max}$ , исходя из (3), в этом случае составит

$$V/v_{\max} \approx (\alpha TW)^{1/2} \approx (10^4)^{1/2} \approx 100.$$

При УЗД ЧМ-сигнала около 2.5 Па (приведенное к 1 м от дельфина) свисты пробегают вдоль бассейна более 300 м (рис. 4), пять раз двойной путь звука вдоль бассейна. Максимальные УЗД ЧМ-сигналов бутылконосых дельфинов, известные из литературы, — амплитудные значения — составляют около 180 дБ относительно 1 мкПа [24], и усредненные значения — около 170 дБ (*rms*) относительно 1 мкПа [20], соответственно, что почти в 1000 раз выше зафиксированных в бассейне (рис. 2–5). Учитывая это, максимальная дальность действия ЧМ-сонаров дельфина в открытом море, при максимальных УЗД ЧМ-сигналов и обработке эхосигналов согласованным фильтром слуха, как показали расчеты [25], может быть близкой к максимальному расстоянию акустического контакта между дельфинами 10.5–20 км [17, 20]. Характеристика направленности ЧМ-сигналов [26] и слуха дельфина [27] в этой области частот невысокая, благодаря этому ЧМ-сигналы облучают и слух соответственно принимает

эхо практически из всего пространства вокруг дельфина. В то же время точность локализации источников звука на этих частотах высокая [28], достигает  $1^\circ$  за счет бинаурального определения положения источника звука (эхо). В свете этих данных можно полагать, что ЧМ-сонары имеют максимальную дальность действия и наилучшую разрешающую способность по времени (18–50 мкс) и соответственно по дальности 0.027–0.075 м, а также лучшую помехозащищенность среди сонаров дельфина.

Вместе с тем, зондирующие ЧМ-сигналы (свисты) предполагаемых сонаров дельфинов [5, 6] и эхолокаторов летучих мышей [29 и др.] используют одинаковую область частот 2–120 кГц, содержат гармоники, и длительность сигналов сопоставима. Подобны также контуры изменения их частоты (линейное или нелинейное возрастание, или понижение частоты от времени с разной скоростью, и их комбинации с повторениями). Принципиальных различий между ЧМ-сигналами дельфинов и летучих мышей нет. Подобные зондирующие сигналы (только без гармоник) используют ЧМ-доплеровские и ЧМ-со сжатием импульса гидролокаторы и радиолокаторы (если не учитывать несущую частоту последних). Эти сложные сигналы обладают высокими корреляционными свойствами, поэтому не удивительно, что используются эхолоцирующими млекопитающими различных отрядов царства животных (Cetacea и Chiroptera) в водной и наземно-воздушной средах, а также в технике для получения высокой точности определения дальности и доплеровского сдвига цели.

Рассмотренные в настоящей работе результаты дают дополнительные подтверждения предположению о функциональности ЧМ-сигналов дельфина в качестве зондирующих сигналов ЧМ-доплеровского сонара и ЧМ-сонара со сжатием импульса [5, 6].

При проведении исследований были соблюдены все применимые международные и национальные руководящие принципы по уходу и использованию животных, а также принципы организации, в которой выполнено исследование.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Lammers M.O., Schotten M., Au W.W.L.* The spatial context of free-ranging Hawaiian spinner dolphins (*Stenella longirostris*) producing acoustic signals // *J. Acoust. Soc. Am.* 2006. V. 119(2). P. 1244–1250.
2. *Watkins W.A., Wartzok D.* Sensory biophysics of marine mammals // *Mar. Mamm. Sci.* 1985. V. 1. P. 219–260.
3. *Caldwell M.C., Caldwell D.K.* Intraspecific transfer of information via the pulsed sound in captive Odontocete Cetaceans // *Animal Sonar Systems: Biology and Bionics* / Ed. Busnel R.G. Laboratoire de Physiologie Acoustique, Jouy-en-Josas, France, 1967. P. 879–936.

4. *Herzing D.L.* Vocalizations and associated underwater behavior of free-ranging Atlantic spotted dolphins, *Stenella frontalis* and bottlenose dolphin, *Tursiops truncatus* // *Aqua. Mamm.* 1996. V. 22. P. 61–79.
5. *Ryabov V.A.* Some Aspects of Analysis of Dolphins' Acoustical Signals // *Open J. Acoustics.* 2011. V. 1. P. 41–54.  
<https://doi.org/10.4236/oja.2011.12006>
6. *Ryabov V.A.* Acoustic Signals and Echolocation System of the Dolphin // *Biophysics.* 2014. V. 59(1). P. 135–147.
7. *Романенко Е. В.* Акустика дельфинов и рыб (обзор) // *Акуст. журн.* 2019. Т. 65. № 1. С. 82–92.
8. *Дубровский Н.А., Заславский Г.Л.* О роли костей черепа в формировании пространственно-временной структуры зондирующего импульса дельфина // *Акуст. журн.* 1975. Т. 3. С. 409–414.
9. *Au W.W.L.* Echolocation signals of Atlantic bottlenose dolphin (*Tursiops truncatus*) in open waters // *Animal sonar systems* / Eds. Busnel R., Fish J. N.Y: Plenum press, 1980. P. 251–282.
10. *Иванов М.П.* Эхолокационные сигналы дельфина при обнаружении объектов в сложных акустических условиях // *Акуст. журн.* 2004. Т. 50. № 4. С. 550–561.
11. *Lilly J.C.* Distress call of the bottlenose dolphin: stimuli and evoked behavioral responses // *Science.* 1963. V. 139. P. 116–118.
12. *Dreher J.J., Evans W.E.* Cetacean communication // *Marine Bioacoustics* / Ed. Tavolga W.N. Oxford: Pergamon Press, 1964. V. 1. P. 373–399.
13. *Caldwell M.C., Caldwell D.K., Tyack P.L.* Review of the signature-whistle hypothesis for the Atlantic bottlenose dolphin // *The Bottlenose Dolphin* / Eds. Leatherwood S., Reeves R.R. San Diego: Academic Press, 1990. P. 199–234.
14. *Tyack P.* Dolphins whistle a signature tune // *Science.* 2000. V. 289. P. 1310–1311.
15. *Lammers M.O., Au W.W.L.* Directionality in the whistles of Hawaiian Spinner dolphins *Stenella Longirostris*: A signal feature to cue direction of movement // *Marine Mammal Sci.* 2003. V. 2. P. 249–264.
16. *Janik V.M.* Whistle matching in wild bottlenose dolphins *Tursiops truncatus* // *Science.* 2000. V. 289. P. 1355–1357.
17. *Janik V.M.* Source levels and the estimated active space of bottlenose dolphin (*Tursiops truncatus*) whistles in the Moray Firth, Scotland // *J. Comp. Physiol. A.* 2000. V. 186. P. 673–680.
18. *Rasmussen M.H., Miller L.A.* Whistles and clicks from white-beaked dolphins, *Lagenorhynchus albirostris*, recorded in Faxaflói Bay, Iceland // *Aqua. Mamm.* 2002. V. 28. P. 78–89.
19. *Rasmussen M.H., Miller L.A.* // *Echolocation in Bats and Dolphins* / Eds Thomas J., Moss C., Vater M. Univ. of Chicago, Chicago, 2004. P. 50–53.
20. *Rasmussen M.H., Lammers M.O., Beedholm K., Miller L.A.* Source levels and harmonic content of whistles in white-beaked dolphins (*Lagenorhynchus Albirostris*) // *J. Acoust. Soc. Am.* 2006. V. 120(1). P. 510–517.  
<https://doi.org/10.1121/1.2202865>
21. *Janik V., Slater P.* Context-specific use suggests that bottlenose dolphin signature whistles are cohesion calls // *Animal Behaviour.* 1998. P. 829–838.
22. *Беликов Р.А., Белькович В.М.* Свисты белух в репродуктивном скоплении у острова Соловецкий в Белом море // *Акуст. журн.* 2007. Т. 55. С. 601–608.
23. *Беликов Р.А., Белькович В.М.* Высокочастотные тональные сигналы белух (*Delphinapterus leucas*) в летнем скоплении у острова Соловецкий в Белом море // *Акуст. журн.* 2006. Т. 52. № 2. С. 156–164.
24. *Richardson W.J., Greene C.R., Malme C.I., Thomson D.H.* *Marine Mammals and Noise.* San Diego: Academic Press, 1995. 576 p.
25. *Рябов В.А.* Гидроакустические закономерности пищевого поведения дельфинов // *Морской биолог. журн.* 2018. Т. 3. № 2. С. 81–97.
26. *Branstetter B.K., Moore P.W., Finneran J.J., Tormey M.N., Aihara H.* Directional properties of bottlenose dolphin (*Tursiops truncatus*) clicks, burst-pulse, and whistle sounds // *J. Acoust. Soc. Am.* 2012. V. 131(2). P. 1613–1621.
27. *Ryabov V.A., Polyakov M.A., Bibikov N.G.* Characterization of beam patterns of bottlenose dolphin in the transverse plane // *Biophysics.* 2011. V. 56. № 3. P. 529–534.
28. *Popov V.V., Supin A.Ya., Klishin V.O., Bulgakova T.N.* Monaural and binaural hearing directivity in the bottlenose dolphin: Evoked-potential study // *J. Acoust. Soc. Am.* 2006. V. 119. P. 636–644.
29. *Mayberry H.W., Faure P.A.* Morphological, olfactory, and vocal development in big brown bats // *Biology Open.* 2015. V. 4. P. 22–34.  
<https://doi.org/10.1242/bio.201410181>