

АКУСТИКА ЖИВЫХ СИСТЕМ.
БИОМЕДИЦИНСКАЯ АКУСТИКА

УДК 599.537:534.28

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЧМ-СИГНАЛОВ (СВИСТОВ)
НОВОРОЖДЕННОЙ ЧЕРНОМОРСКОЙ АФАЛИНЫ
(*TURSIOPS TRUNCATUS*)

© 2022 г. В. А. Рябов*

Карадагская научная станция им. Т.И. Вяземского – природный заповедник РАН, филиал ФГБУН ФИЦ
“Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН”,
ул. Науки 24, п. Курортное, Феодосия, Крым, 298188 Россия

*e-mail: ryaboff@inbox.ru

Поступила в редакцию 17.02.2021 г.

После доработки 09.09.2021 г.

Принята к публикации 25.01.2022 г.

Известно, что неонатальные дельфины начинают издавать ЧМ-сигналы (свисты) сразу после рождения. Цель нашей работы – изучение динамики параметров ЧМ-сигналов новорожденной в первые дни ее жизни. Акустические сигналы новорожденной самки дельфина афалины (*Tursiops truncatus*) и ее родителей были записаны с помощью двухканальной системы в полосе частот 0.1–220 кГц с динамическим диапазоном 81 дБ, через 22, 46, 46.5 и 47 ч после рождения. ЧМ-сигналы сопоставлены с дельфинами, измерены и проанализированы параметры сигналов, особенности их динамики и распределения значений. Показано, что новорожденная периодически продуцирует серии ЧМ-сигналов путем перебора их частотных контуров и значений параметров в случайном порядке без повторений. При этом большинство параметров ЧМ-сигналов имеют квазинормальное распределение значений, поэтому более 90% сигналов не имеют экстремальных (максимальных и минимальных) значений соответствующих параметров. Рассмотренные механизмы формирования ЧМ-сигналов новорожденной, вероятно, играют ключевую роль в оптимизации развития и тестирования совместной работы органов и систем их генерации, рецепции и слуховой обработки в раннем постнатальном онтогенезе.

Ключевые слова: дельфин афалина (*Tursiops truncatus*), новорожденная самка, ЧМ-сигнал (свист), перебор частотных контуров без повторений в случайном порядке

DOI: 10.31857/S032079192203011X

ВВЕДЕНИЕ

Дельфины живут в водной среде несколько десятков миллионов лет. Основными сенсорными посредниками животных в этой среде являются звуки. Они общаются и воспринимают мир вокруг себя с помощью различных акустических сигналов и эхолокационной системы [1]. Однако на сегодняшний день знаний об акустических сигналах, их функциональности и обработке слухом дельфинов недостаточно (см. [2] и др.).

Сигналы взрослых дельфинов модифицируются на протяжении всей жизни под воздействием множества факторов, поэтому представляет интерес изучение сигналов новорожденных дельфинов с оригинальными акустическими характеристиками [3]. Наибольшее количество работ на сегодняшний день посвящено изучению частотно-модулированных (ЧМ) сигналов дельфинов, известных как свисты [1–19] и др. Однако реги-

страция этих сигналов производилась в основном только в полосе частот до 22 кГц или меньше.

У изученных представителей семейства дельфинов (*Delphinidae*) взрослые особи используют свисты для поддержания сплоченности и координации действий между собой и группами дельфинов, рассредоточенными в пространстве на расстояниях до 10–12 км [5, 8–10]. Каждый дельфин имеет собственный отличительный свист, с уникальной для каждой особи формой частотного контура, играющий индивидуально опознавательную роль, так называемый “автограф”. Форма частотного контура “свиста-автографа” воспроизводится дельфином с сохранением легко узнаваемого паттерна с небольшими изменениями и является доминирующей в индивидуальном репертуаре звуков особи (до 90%), что подтверждается большим количеством работ [5, 9–13] и др. Есть также свисты с вариабельным контуром, фрагментарные свисты и другие, роль которых пока не ясна [14].

С точки зрения теории сигналов, ЧМ-сигналы относятся к классу шумоподобных сигналов или сигналов с расширенным спектром [15–18]. База этих сигналов, т.е. произведение длительности сигналов на их диапазон частот, $TW \gg 1$, где T – средняя длительность сигнала, W – средний диапазон частот. Для свистов взрослых дельфинов диапазон их основных частот может достигать 1–42 кГц, а длительность от 0.048 до 4.11 с, и $TW \approx 10^4$ – 10^5 [15, 16, 5, 18–21]. Число гармоник свиста может изменяться от 1 до 50 и более, и в соответствии с ним изменяется частотное расстояние между гармониками. Диапазон частот ЧМ-сигналов дельфинов, учитывая гармоники, может занимать всю полосу частот их слуха, 1–140 кГц. Скорость изменения основной частоты свистов может составлять от 0 до 250–420 кГц/с [15, 16, 11]. Взрослые дельфины умеют плавно и с высокой точностью изменять частоту ЧМ-сигналов. Вместе с тем, ЧМ-сигналы дельфина рассматриваются в качестве зондирующих сигналов эхолота со сжатием импульса и Доплеровского сонара [17, 18]. ЧМ-сигналы дельфинов, как это следует из их характеристик, по-видимому, самые сложные среди сигналов дельфинов.

При рассмотрении ЧМ-сигнала дельфина мы обычно используем термины его спектрограммы, которая представляет собой график зависимости частоты от времени, или просто частотный контур свиста.

Китообразные анализируют ЧМ-сигналы обычным слухом. В то же время в работах [2, 15–18, 22, 23] авторы обсуждают возможность использования их в качестве зондирующих сигналов ЧМ-сонара и обработки отражений свистов (эха) в согласованном фильтре слуха животных, который, по-видимому, организует их слуховая система для каждого ЧМ-сигнала.

Таким образом, несмотря на сложные особенности ЧМ-сигналов, их неоднозначную роль и различные методы обработки [2, 17, 18, 22, 23], известно, что неонатальные дельфины начинают их продуцировать сразу после рождения [3, 4, 11, 25].

Цель нашей работы – изучение динамики параметров ЧМ-сигналов новорожденной афалины (*Tursiops truncatus*) в первые дни ее жизни. Для этого звуковые сигналы новорожденной и ее родителей были записаны двухканальной системой записи в широком диапазоне частот 0.1–220 кГц с широким динамическим диапазоном 81 дБ. Сигналы были сопоставлены с дельфинами. Параметры ЧМ-сигналов и особенности их динамики измерены и проанализированы. Изучено акустическое поведение дельфинов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Метод

Новорожденная (самка) и ее родители, черноморские дельфины афалины (*Tursiops truncatus*) с именами Яна (22 года, ♀) и Яша (32 года, ♂), размещались в закрытом бассейне (размером 27.5 × 9.5 × 4.5 м) Карадагской научной станции им. Т.И. Вяземского – природный заповедник РАН – филиал ФГБУН ФИЦ “Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН”. Новорожденная родилась 08.06.2015 г. и находилась в бассейне вместе с родителями. Других дельфинов в бассейне не было.

Вскоре после рождения новорожденная начала свистеть, что было слышно в бассейне невооруженным ухом, когда она проплывала рядом. Первая запись ее сигналов была сделана примерно через 22 часа после рождения, в первой половине дня. Всего было сделано четыре записи акустических сигналов новорожденной и ее родителей одновременно с видеозаписями их положения относительно гидрофонов и друг друга в бассейне, примерно через 22, 46, 46.5 и 47 ч после рождения, соответственно. Продолжительность каждой записи около 9 мин, всего около 36 мин.

Акустические сигналы дельфинов регистрировались двухканальной системой синхронно с видеозаписью их положения друг относительно друга и записывающих гидрофонов I и II каналов записи во время их кормления (рис. 1) возле мостков 3. Расстояние между гидрофонами I и II было выбрано равным 5 м для получения необходимой межканальной разности временных задержек и амплитуд уровней звуковых давлений (УЗД) каждого сигнала. Гидрофоны располагались таким образом (рис. 1), что гидрофон I располагался ближе к середине бассейна, а гидрофон II ближе к стенке. Запись видео производилась с балкона, расположенного вдоль бассейна на высоте около 5 м над уровнем воды. Новорожденная в это время обычно плавала вокруг родителей и, соответственно, вокруг гидрофонов (по дуге радиусом 1–5 м). Иногда она заплывала под мостки, иногда в противоположный конец бассейна (около 23 м). Яна в этих случаях, через какое-то время, следовала за ней, несколько минут они могли там оставаться, но потом вместе возвращались к мосткам 3. Яша во время записи сигналов, как правило, находился у мостков.

Гидрофоны I и II (рис. 1) пьезокерамические, сферические, диаметром 14 мм и калиброванной чувствительностью –203.5 и –206 дБ отн. 1 В/мкПа, или 66.5 и 50 мкВ/Па соответственно. Неравномерность АЧХ гидрофонов не превышала ± 3 дБ на частотах около 160 кГц и ± 10 дБ на частотах около 220 кГц. Каждый канал записи сигналов состоял из гидрофона, фильтра верхних частот (0.1 кГц), усилителя напряжения (40 дБ) и

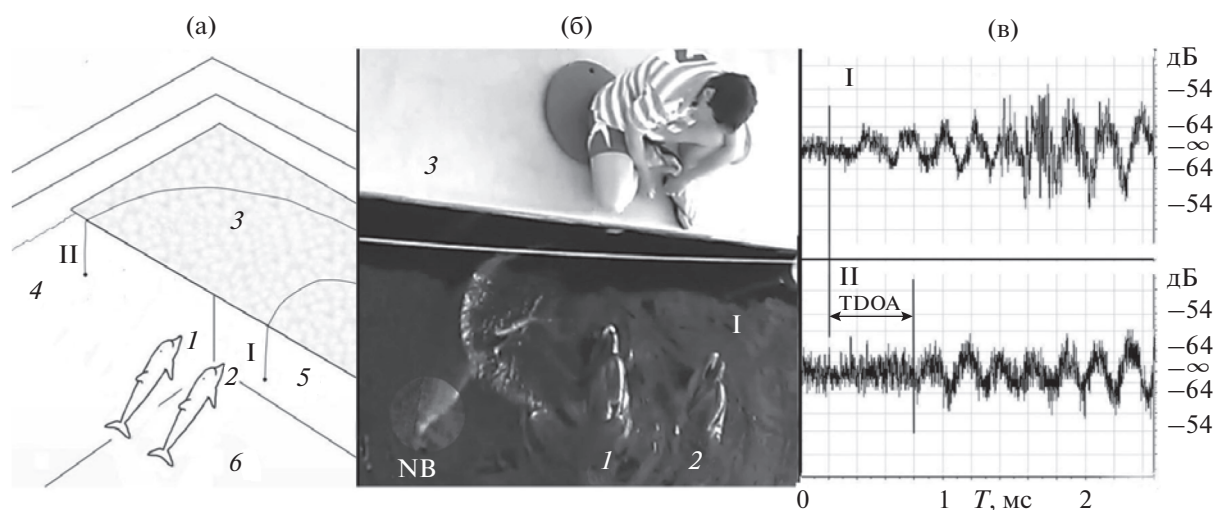


Рис. 1. Схема эксперимента. (а) – 1, 2 – дельфины Яша и Яна соответственно. I и II – гидрофоны первого и второго каналов регистрации, соответственно, расположены на расстоянии 5 м друг от друга и на глубине 1 м. 3 – мостки, расположены на высоте 0.2 м над уровнем воды. 4, 5 и 6 – длинная, короткая стенка и дно бассейна, соответственно. Расстояние между гидрофоном II и стенкой 4 составляет 0.4 м. Расстояние от гидрофонов I и II до стенки 5 – 3 м. Уровень воды в бассейне 4 м. (б) – Один из кадров видеозаписи. NB – новорожденная, 1 – Яша, 2 – Яна, 3 – мостки, I – гидрофон первого канала записи. (в) – Межканальная временная задержка ЧМ-сигнала (TDOA), который NB продуцировала из местоположения, показанного на рис. 1б.

одного из каналов многоканального 14-разрядного аналого-цифрового преобразователя (АЦП) USB-3000. АЦП одновременно оцифровывал сигналы дельфинов с I и II каналов регистрации с частотой дискретизации каждого из них 1 МГц. После АЦП сигналы непрерывно записывались на жесткий диск ноутбука в двухканальном PGC файле для последующего анализа и обработки. Динамический диапазон АЦП и тракта приема сигналов составлял 81 дБ (0.2–3000 Па).

Для определения принадлежности ЧМ-сигнала конкретному дельфину исследователи используют технику записи акустических сигналов с одновременной видеозаписью поведения всех дельфинов. Проанализировав видео, они пытаются определить свист по его аккомпанементу пузыряющейся струей, которая часто исходит от дельфина, производящего свист, особенно у новорожденных [3, 4, 6, 25]. Хотя также известно, что не каждый свист дельфина сопровождается пузырьками воздуха [26]. В некоторых случаях исследователи помещают дельфинов в отдельные бассейны, чтобы определить свисты конкретного дельфина. Следовательно, использование этих методов вызывает определенные трудности и нечеткости при определении производителя сигнала.

Учитывая эти проблемы, мы попытались определить ЧМ-сигналы новорожденной с учетом всех доступных нам для анализа признаков. С этой целью мы записали акустические сигналы новорожденной афалины на два канала в широком диапазоне частот и с широким динамическим диапазоном. Для идентификации свистов

новорожденной учитывалась межканальная временная задержка свиста (time difference of arrival – TDOA) на I и II гидрофонах (рис. 1). Например, для определения производителя свиста мы измеряли TDOA свиста в эксперименте (рис. 1в) и сравнивали с рассчитанным TDOA (CTDOA). Последний рассчитывался с учетом разницы расстояний от головы новорожденной до I и II гидрофонов по синхронному видео (рис. 1б). Расстояния рассчитывались с учетом известного расстояния между гидрофонами и других известных видимых размеров объектов и углов, а также известных тригонометрических соотношений. Расчетные расстояния от головы новорожденной до I и II гидрофонов составляют 2.3 и 3.1 м, разница между этими расстояниями составляет 0.8 м, что с учетом скорости звука составляет CTDOA около 0.53 мс, что, в свою очередь, соответствует измеренному TDOA, около 0.5–0.6 мс (рис. 1в). Расчетные расстояния от головы Яши (Яны) до I и II гидрофонов составляют 1.6 и 4.2 м (1.1 и 4.5 м), разница между этими расстояниями составляет 2.6 м (3.4 м), что с учетом скорости звука составляет CTDOA около 1.7 мс (2.2 мс), что не соответствует измеренному TDOA около 0.5–0.6 мс (рис. 1в). Следовательно, свист, показанный на рис. 1, был произведен новорожденной. Максимальное значение TDOA для расстояния между гидрофонами 5 м составляет 3.33 мс.

Вместе с тем, полученные записи позволили идентифицировать сигналы новорожденной по характеру их спектрограмм и спектру, а также по другим признакам. Важнейшие признаки спек-

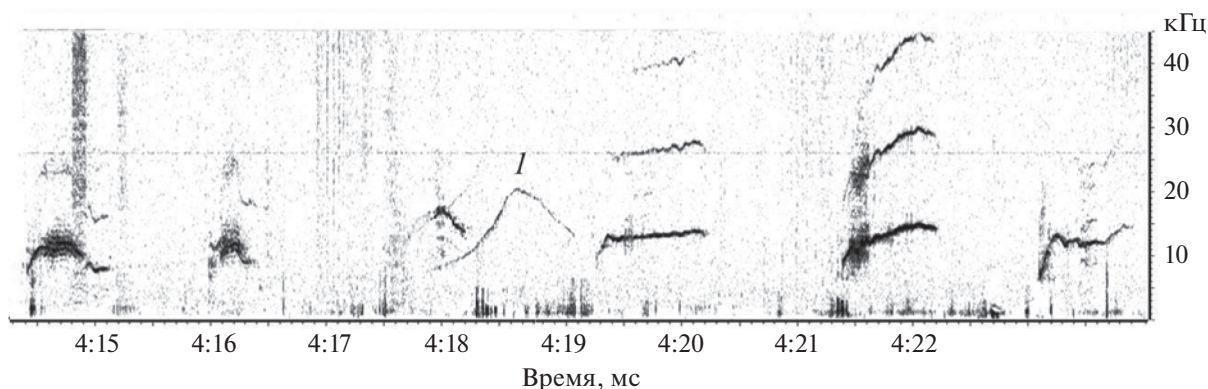


Рис. 2. Пример последовательности ЧМ-сигналов новорожденной, а также Яны (отмечена на рисунке цифрой 1). (Спектрограмма фрагмента первой записи).

программ свистов новорожденной, отличающие их от ЧМ-сигналов взрослых, — динамика продуцирования сигналов во времени. Новорожденная издает ЧМ-сигналы сериями с интервалами времени между свистами, соизмеримыми с длительностью свистов (рис. 2, 3, 5). В этом случае любой ЧМ-сигнал родителей не будет синхронизирован с серией, т.е. неизбежно будет перекрываться с сигналами новорожденной, что легко различить, рис. 2 (линия 1). Когда случались такие редкие случаи (например, как на рис. 3), ЧМ-сигналы, как правило, были свистами-автографами родителей или характерными для них свистами, которые нам хорошо известны, поскольку мы записывали их много раз раньше (в течение примерно 10 лет). Другой важный признак ЧМ-сигналов новорожденной — несовершенство характеристик, например, по сравнению со свистом Яны, рис. 2 (линия 1). Видно, что изменение частоты ЧМ-сигналов новорожденной происходит не плавно, а с заметным тремором, часто с перебойми в их генерации, возбуждением шума (размытость спектро-

грамм), более широким спектром их основных частот и частот гармоник, что отмечалось и в работах [3, 5, 25].

Запись, визуализация и обработка записанных акустических сигналов дельфинов выполнены с помощью программных пакетов PowerGraph 3.3.8, Adobe Audition 3.0 и Excel 2016 с пакетом “Анализ данных”. Для анализа были отобраны все записанные ЧМ-сигналы, т.к. они имели достаточно высокое отношение сигнал/шум. Среднеквадратичные значения (*rms*) УЗД ЧМ-сигналов на расстоянии 1 м от дельфина были рассчитаны для всего массива выборок каждого ЧМ-сигнала с использованием функции RMS в окне “обработка сигналов” PowerGraph 3.3.8 с учетом дальности животного от гидрофона, чувствительности гидрофона и усиления приемного тракта.

Для статистического анализа записей новорожденной были измерены и рассчитаны различные параметры ЧМ-сигналов, традиционно используемые для этих целей (табл. 2), такие как:

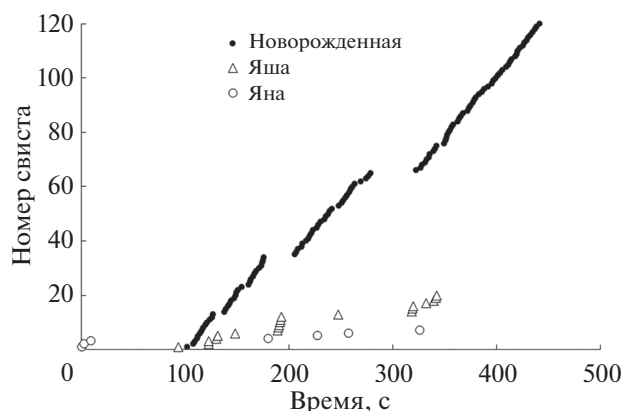


Рис. 3. Распределение свистов новорожденной и родителей (Яны и Яши) в первой записи.

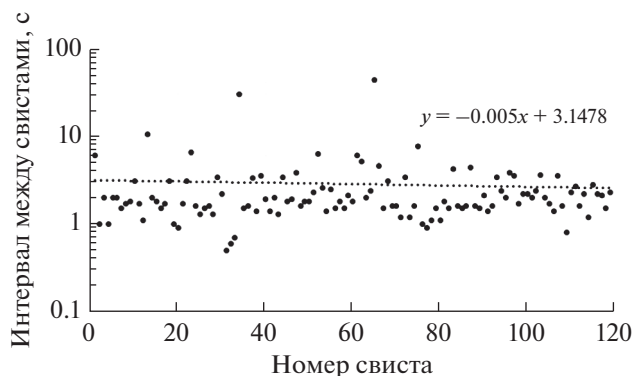


Рис. 4. Распределение интервалов между свистами новорожденной в первой записи (рис. 3). Линия тренда — модель простой линейной регрессии ($p = 0.001$, $r = 0.183$).

начальная частота, конечная частота, минимальная частота, максимальная частота, диапазон частот, количество гармоник, длительность, количество точек перегиба основной частоты, а также максимальная частота свиста с учетом гармоник, диапазон его частот с гармониками, произведение длительности свиста на его диапазон частот и тоже самое с учетом гармоник, а также максимальное и минимальное значения этих параметров, соответственно.

Учитывая, что поток энергии излучающей системы ЧМ-сигналов дельфина, в свете теории сигналов и эхолокации, определяют такие их параметры как длительность, межсигнальный интервал и широкополосность, для анализа этих параметров были использованы модели простой линейной регрессии.

Отметим, что диапазон частот свиста дельфина с учетом гармоник (WH) определялся как $WH = F_{\max}(NoH) - F_{\min}$, где F_{\max} – максимальная основная частота свиста, F_{\min} – его минимальная основная частота, NoH – количество гармоник свиста. Учитывая, что частоты гармоник свиста кратны его основной частоте, максимальная частота свиста с учетом гармоник (FH_{\max}) определялась как $FH_{\max} = F_{\max}(NoH)$, где F_{\max} – максимальная основная частота, NoH – количество гармоник свиста.

Учитывая широкий частотный диапазон регистрирующей системы 0.1–220 кГц, мы впервые для зубатых китов измерили базу ЧМ-сигналов новорожденной, т.е. произведение длительности свиста на диапазон его частот ($ТW$) и то же самое с учетом гармоник ($ТWH$), где T – средняя длительность, а W – средний диапазон частот ЧМ-сигнала (табл. 2).

Параметры ЧМ-сигналов, их спектры и спектрограммы рассчитаны с помощью Adobe Audition 3.0 с использованием 2048-точечного БПФ с весовой функцией Хэмминга. Статистический и количественный анализ параметров ЧМ-сигналов, генерация гистограмм распределения их значений и построение простых линейных моделей

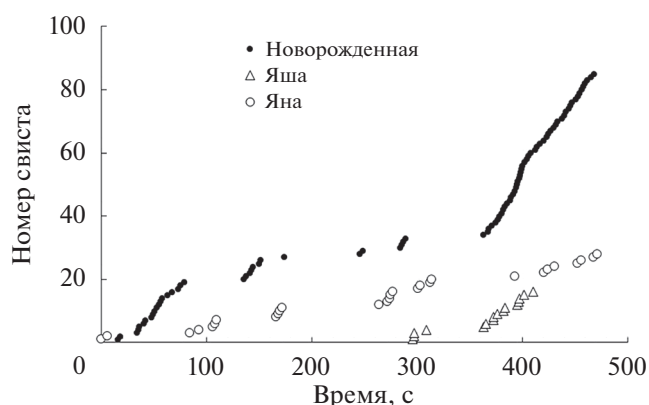


Рис. 5. Распределение свистов новорожденной и родителей во второй записи.

регрессии выполнены в электронной таблице Excel 2016 с пакетом “Анализ данных”.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Новорожденная продуцировала свисты сериями до 54 сигналов подряд с заметными временными паузами между сериями. Паузы между сериями ЧМ-сигналов изменялись от нескольких секунд до 100 с. Условимся, что пауза больше 10 с разделяет одну серию свистов от другой.

Во время первой записи новорожденная издала 120 свистов в течение 339 с (рис. 2, 3, 4, табл. 1), т.е. каждый свист она издавала приблизительно через $339/120 = 2.8$ с. Величина среднего значения интервалов между свистами, на протяжении первой записи, в соответствии с моделью простой линейной регрессии имела тенденцию к уменьшению с 3.1 до 2.6 с ($p = 0.001$; $r = 0.183$).

Скорость сигнализации при этом составляла 31.2, 31, 24.5 и 27.2 мин⁻¹ для первой, второй, третьей и четвертой серии свистов, соответственно. При этом межсигнальные интервалы (60/скорость сигнализации) составляли: 1.92, 1.93, 2.44, и 2.2 с, соответственно, и их среднее арифметическое значение составляет 2.12 с. Отметим, что минимальное значение этого интервала могло до-

Таблица 1. Количество свистов дельфинов в разных записях. В скобках указано количество свистов-автографов

Номер записи	Количество свистов (свисты-автографы)			Время записи, с
	Яна	Яша	Новорожденная	
1	7(0)	20(17)	120	543
2	28(0)	16(11)	85	532
3	8(3)	10(10)	77	544
4	24(17)	3(3)	69	534
Всего	67(20)	49(41)	351	2153

Таблица 2. Среднее значение \pm стандартное отклонение, максимальное (max) и минимальное (min) значения различных параметров ЧМ-сигналов новорожденной в первой (1) и второй (2) записях, соответственно

	Среднее значение		max		min	
	1	2	1	2	1	2
Номер записи						
Начальная частота, кГц	8.55 \pm 2.79	7.01 \pm 2.28	18.12	13.63	2.50	1.73
Конечная частота, кГц	11.77 \pm 2.41	13.2 \pm 2.93	17.51	22.40	7.01	7.05
Максимальная частота, кГц	13.43 \pm 2.23	14.51 \pm 2.42	18.20	22.40	7.51	8.23
Максимальная частота с гармониками, кГц	36.52 \pm 17.67	38.56 \pm 20.32	116.10	90.21	6.16	11.17
Минимальная частота, кГц	8.01 \pm 2.20	6.94 \pm 2.19	14.12	12.40	2.50	1.73
Диапазон частот с гармониками, кГц	28.51 \pm 18.01	31.62 \pm 21.10	108.21	84.24	3.24	12.25
Диапазон частот, кГц	5.42 \pm 2.70	7.57 \pm 3.50	14.23	16.85	0.51	4.25
Число гармоник	2.72 \pm 1.22	2.58 \pm 1.19	8	6	1	1
Длительность, с	0.66 \pm 0.23	0.57 \pm 0.22	1.34	1.20	0.07	0.08
Число точек перегиба	1.80 \pm 1.39	0.87 \pm 1.15	7	6	0	0
(TWH)/10 ⁴	1.88 \pm 1.19	2.2 \pm 1.21	7.13	4.81	0.21	0.71
(TW)/10 ⁴	0.36 \pm 0.18	0.43 \pm 0.2	0.94	0.96	0.20	0.20

стигать 0.5 с (рис. 4). Учитывая среднюю длительность свистов первой записи, 0.66 с (табл. 2), средний интервал между свистами при измерении его от конца первого сигнала до начала следующего, составит 1.46 с.

Во время второй записи новорожденная издала 85 свистов за 453 с (рис. 5, 6), т.е. каждый свист она издавала приблизительно через $453/85 = 5.3$ с. Скорость сигнализации составляла 21.4 и 29.2 мин⁻¹ для первой и последней серии, соответственно. При этом межсигнальные интервалы (60/скорость сигнализации) составляли: 2.8 и 2.05 с, соответственно, и среднее арифметическое значение этого интервала составляет 2.45 с. Учитывая среднюю длительность свистов второй записи, 0.57 с (табл. 2), средний интервал между свистами (при измерении их от конца первого до начала следующего) составит 1.88 с. Отметим, что на наиболее крутом участке графика от 391 с до 400 с (рис. 5) скорость сигнализации достигала даже 60 мин⁻¹. На протяжении второй записи средние значения частотного диапазона, частотного диапазона с гармониками и длительности свистов (рис. 6), при аппроксимации их моделью простой линейной регрессии, имели тенденцию к увеличению с 5.5 до 10 кГц ($p = 0.002$; $r = 0.121$), с 13 до 30 кГц ($p = 0.007$; $r = 0.195$) и с 0.54 до 0.59 с ($p = 0.005$; $r = 0.191$), соответственно.

В третьей записи она издала 72 свиста за 177 с. В среднем каждый через 2.46 с, и еще 5 свистов были очень редкими (табл. 1). Во время четвертой записи новорожденная издала 44 свиста регулярно за 159 с, в среднем каждый через 3.61 с, и еще 22 свиста за 60 с, т.е. в среднем каждый через 2.72 с, а еще 3 свиста были очень редкими.

Впервые для зубатых китов мы измерили УЗД свистов новорожденной. Амплитуда УЗД составила 126–142 дБ отн. 1 мкПа в области гидрофонов и 128–159 дБ отн. 1 мкПа на расстоянии 1 м. Рассчитанные среднеквадратичные (*rms*) значения УЗД в области гидрофонов составили 112–129 дБ отн. 1 мкПа (*rms*) и 115.6–146 дБ отн. 1 мкПа (*rms*) на расстоянии 1 м. Рассчитанные *rms* значения УЗД для ЧМ-сигналов наших дельфинов были на 11.7–16 дБ, т.е. в среднем примерно на 13 дБ меньше амплитудных.

У Яны УЗД свистов, приведенный к 1 м, достигал 140–158 дБ отн. 1 мкПа и 127–145 дБ отн. 1 мкПа (*rms*). У Яши УЗД свистов, приведенный к 1 м, достигал 138–161 дБ отн. 1 мкПа и 125–148 дБ отн. 1 мкПа (*rms*). В целом УЗД свистов новорожденной в этих записях находился на уровне свистов родителей.

ЧМ-сигналы новорожденной с первых же суток жизни уже достаточно широкополосные, средние значения \pm стандартное отклонение их максимальной частоты с учетом гармоник в первой и второй записях составляют 36.52 ± 17.67 кГц и 38.56 ± 20.32 кГц, а максимальные значения около 116 и 90 кГц, соответственно (табл. 2). Средние значения \pm стандартное отклонение частотного диапазона ЧМ-сигналов с учетом гармоник в первой и второй записях составляют 28.51 ± 18.01 кГц и 31.62 ± 21.10 кГц с максимальными значениями 108 и 84 кГц, соответственно. Средние значения длительности свиста в первой и второй записях составляют 0.66 ± 0.23 с и 0.57 ± 0.22 с, а максимальные значения около 1.34 и 1.20 с соответственно. ЧМ-сигналы уже могут иметь до 11 гармоник (рис. 8). Средние значения базы свистов, т.е. произведения длительно-

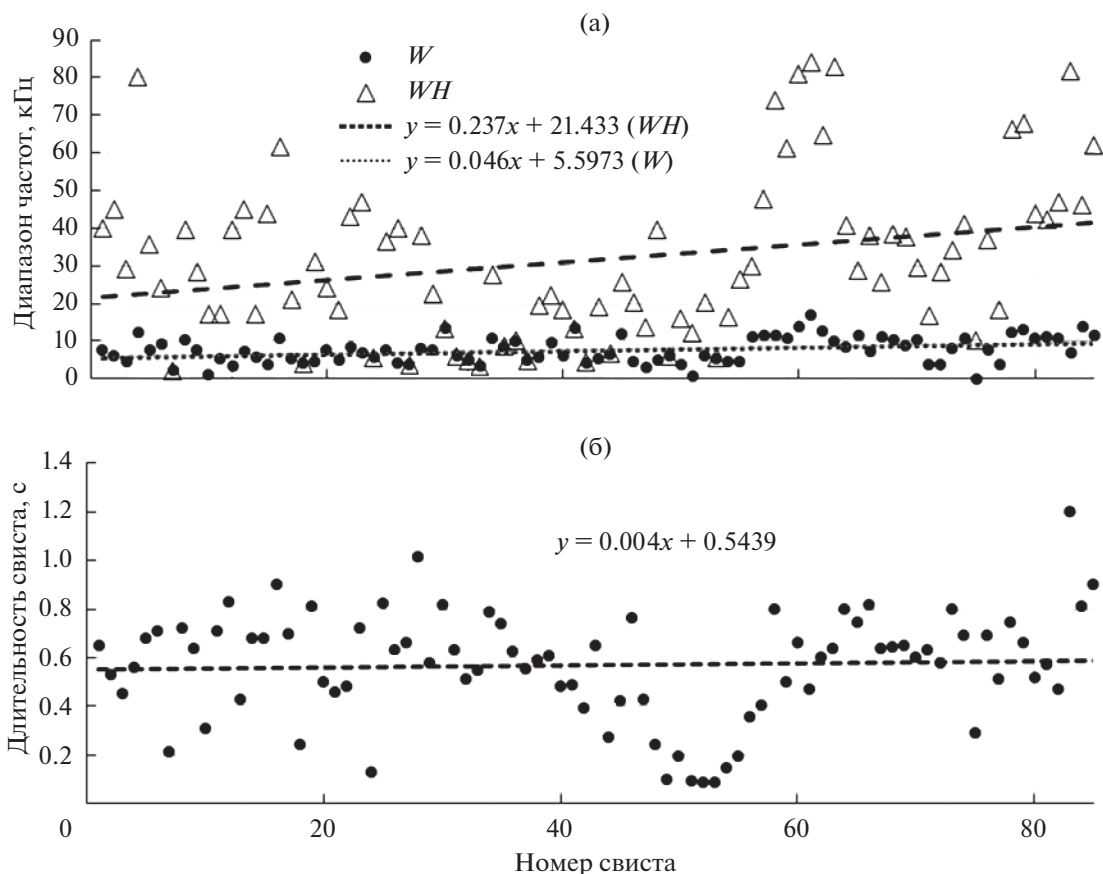


Рис. 6. (а) – Распределение диапазона частот (W) и диапазона частот с гармониками (WH), а также (б) – длительности свистов новорожденной во второй записи. Приведены линии тренда – модели простой линейной регрессии: (а) для W ($p = 0.002$, $r = 0.121$); для WH ($p = 0.007$, $r = 0.195$); (б) ($p = 0.005$, $r = 0.191$).

сти на диапазон частот свиста (TW) в первой и второй записях составляют $(0.36 \pm 0.18) \times 10^4$ и $(0.43 \pm 0.21) \times 10^4$, а максимальные значения 0.94×10^4 и 0.96×10^4 , соответственно. Средние значения этого произведения с учетом гармоник (TWH) составляют примерно $(1.88 \pm 1.19) \times 10^4$ и $(2.2 \pm 1.21) \times 10^4$, а максимальные значения 7.13×10^4 и 4.81×10^4 , соответственно.

Впервые для зубатых китов визуальный анализ наших записей показал, что новорожденная периодически продуцировала серии ЧМ-сигналов, форма частотных контуров которых формально различная и не повторялась. При этом большинство параметров свиста (начальная частота, конечная частота, минимальная частота, максимальная частота, максимальная частота с учетом гармоник, длительность, количество гармоник, количество точек перегиба, межсигнальные интервалы) изменялись случайным образом от свиста к свисту (рис. 2, 4, 6, 7) с распределением значений, когда только около 10% из них являются экстремальными. Назовем условно такой закон распределения значений квазинормальным. Од-

нако такие параметры ЧМ-сигналов, как диапазон частот и диапазон частот с гармониками, меняются от свиста к свисту случайным образом, но имеют квазиравномерное распределение значений (рис. 7).

Факты сложного акустического поведения дельфинов также были зафиксированы, рис. 3, 5.

ОБСУЖДЕНИЕ

Вскоре после рождения новорожденная афалина периодически продуцировала серии ЧМ-сигналов в течение дня и ночи. Примеры записи ее сигналов и их характеристики показаны на рис. 2–8. Измеренные нами УЗД свистов новорожденной и ее родителей в этих записях принципиально не различались. В то же время амплитуда УЗД ее свистов, 128–159 дБ отн. 1 мкПа на расстоянии 1 м и рассчитанные среднеквадратичные значения их УЗД 115.6–146 дБ отн. 1 мкПа (rms) на расстоянии 1 м, были существенно ниже, чем известные из литературы максимальные УЗД взрослых дельфинов афалин в бассейне 173 дБ отн. 1 мкПа на 1 м [27, табл. 7.2] и

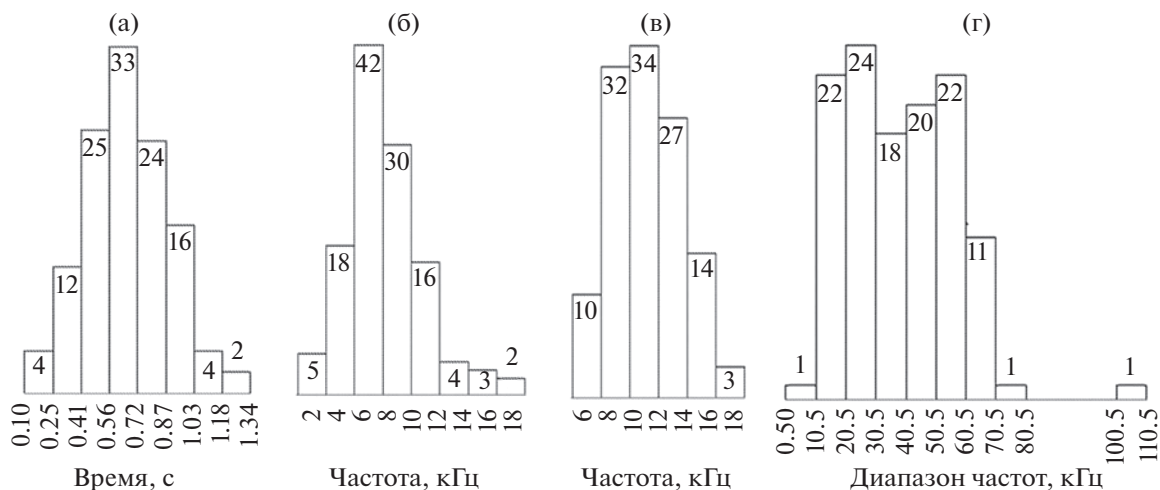


Рис. 7. Гистограммы распределения (а) – длительности, (б) – начальной и (в) – конечной частот, а также (г) – диапазона частот с гармониками ЧМ-сигналов новорожденной в первой записи. Значения на гистограммах показывают количество ЧМ-сигналов.

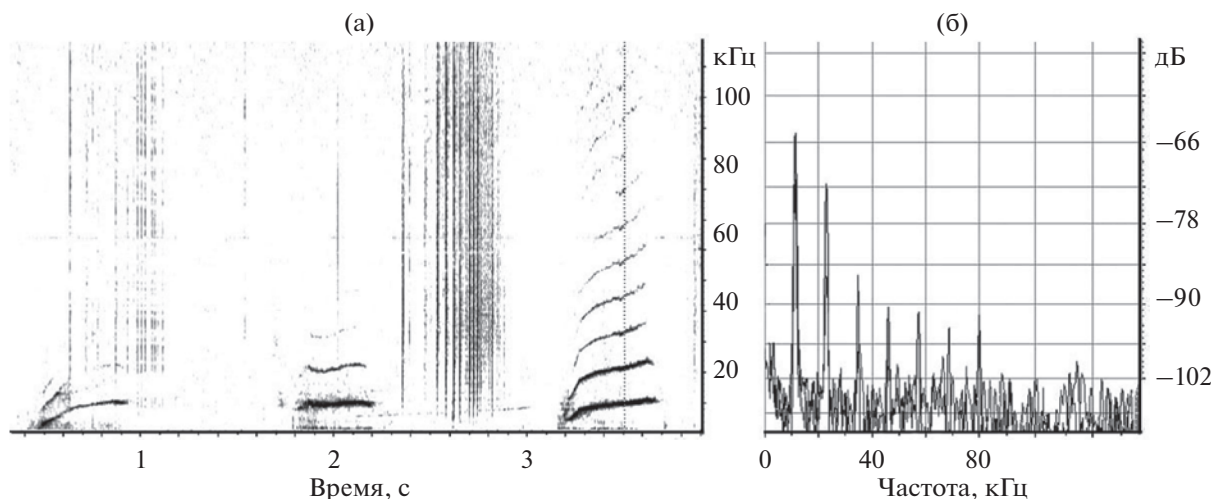


Рис. 8. (а) – Спектрограмма трех последовательных свистов новорожденной из четвертой записи и (б) – спектр свиста в момент времени 3.5 с.

на открытой воде – 169 дБ отн. 1 мкПа (*rms*) на 1 м [28], соответственно.

Измеренные и рассчитанные нами значения характеристик свистов новорожденной, традиционно используемых для количественного и статистического анализа (рис. 2–6, табл. 1, 2), в целом согласуются с результатами работ других авторов [3, 7], с учетом времени, прошедшего с момента рождения и полосы частот регистрации. Учитывая широкий частотный диапазон нашей регистрирующей системы 0.1–220 кГц, мы впервые для зубатых китов измерили диапазон частот и максимальную частоту свистов новорожденной с учетом гармоник, количество гармоник, базу сигналов, т.е. произведение длительности ЧМ-

сигналов на их диапазон частот (*TW*) и то же с учетом гармоник (*TWH*), а также максимальное и минимальное значения этих параметров, соответственно (табл. 2). Следует отметить, что максимальные значения (*TWH*) в первой и второй записях достигают 7.13×10^4 и 4.81×10^4 , соответственно, т.е. они практически достигают уровней, характерных для взрослых дельфинов 10^4 – 10^5 [15, 16].

Во время записи новорожденная продуцировала в несколько раз больше свистов (351), чем ее родители – Яна (67) и Яша (49), соответственно (табл. 1), однако среди разнообразных контуров ее свистов специфического повторяющегося

контура не было. Другими словами, свист-автограф новорожденной не зарегистрирован.

Частота продуцирования ЧМ-сигналов новорожденной (рис. 2–6) составляла 24–60 мин⁻¹. Средние значения межсигнальных временных интервалов (от конца первого до начала следующего) составляли от 1.46 до 1.88 с, а минимальный интервал между свистами мог составлять всего 0.5 с, в первой и второй записях соответственно. Количество свистов, издаваемых новорожденной в этих записях, даже по самым умеренным оценкам, может достигать примерно 500 ч⁻¹. Хотя в работах с косвенным подсчетом свистов, по наличию пузырьков воздуха одновременно со свистом, это количество на 1–2 порядка меньше. Например, по данным работ [3, 7] количество свистов у новорожденных дельфинов увеличивалось в течение 30 дней от нескольких свистов в час до 50–80 ч⁻¹. Возможно, это было связано с консервативным методом определения продуцента ЧМ-сигнала в этих экспериментах. Тот факт, что новорожденная издает в несколько раз больше свистов, чем родители (рис. 3, 5, табл. 1), согласуется с представлением о том, что свисты новорожденных способствуют воссоединению их с матерью, поскольку косвенно передают информацию об их местонахождении [6, 7].

В работах разных авторов отмечалось, что новорожденные издают свист сразу после рождения, и большинство сигналов еще не совершенно. Они не такие сложные и менее чистые, чем ЧМ-сигналы взрослых дельфинов. Считается, что система продуцирования свистов у новорожденных еще недостаточно развита [11, 25].

Из-за несовершенства ЧМ-сигналов в первые часы жизни их называют свистами-криками [11, 25]. В то же время новорожденные могли издавать отчетливый свист уже в первые 48 ч жизни, но пока не могли делать это надежно [3, 4, 25], что также подтверждается в нашей работе. Присутствие свистов-криков предполагает, что новорожденные дельфины должны развивать мышцы и управление ими, прежде чем они смогут должным образом воспроизводить ЧМ-сигналы [25]. Вокальная тренировка новорожденных для продуцирования ЧМ-сигналов обсуждалась в работах различных авторов [5, 7, 9].

Впервые для зубатых китов анализ динамики параметров ЧМ-сигналов новорожденной показал, что она периодически продуцирует серии ЧМ-сигналов, форма которых формально различная и не повторяется. Другими словами, она продуцирует ЧМ-сигналы путем перебора их частотных контуров без повторов в случайном порядке. При этом большинство параметров сигналов (начальная частота, конечная частота, минимальная частота, максимальная частота, максимальная частота с учетом гармоник, длитель-

ность, количество гармоник, количество точек перегиба, временные интервалы между свистами) меняются от свиста к свисту случайным образом и имеют квазинормальное распределение значений (рис. 2, 4, 6, 7). Благодаря этому более 90% ЧМ-сигналов не имеют экстремальных (минимальных и максимальных) значений соответствующих параметров, что, по-видимому, увеличивает эффективность развития органов, продуцирующих звук, поскольку это согласуется с общими представлениями о том, что сигналы со средними значениями параметров широкого диапазона легче воспроизводить без сбоев и искажений. Однако такие параметры ЧМ-сигналов, как диапазон частот и диапазон частот с гармониками, имели квазиравномерное распределение значений (рис. 7). Это может свидетельствовать о том, что механизмы изменения таких параметров, как глубина частотной модуляции и количество гармоник в сигналах, уже хорошо развиты, и новорожденная, видимо, проверяла правильность формирования ЧМ-сигналов с различными значениями параметров. Благодаря рассмотренному механизму формирования ЧМ-сигналов, по-видимому, развиваются оптимальная подвижность и управление органов продуцирования ЧМ-сигналов новорожденной. В информатике полный перебор, также известный как генерация и проверка, является общим методом решения проблем. В нашем случае новорожденная, вероятно, систематически воспроизводит все необходимые ей частотные контуры ЧМ-сигналов и проверяет верность их воспроизведения, слушая каждый из них. Можно также предположить, что она пыталась исправлять воспроизведение сигналов, но это трудно проверить и не заметно на рис. 2. Рассмотренные механизмы формирования ЧМ-сигналов новорожденной, вероятно, играют ключевую роль в оптимизации развития и тестирования совместной работы органов и систем их генерации, рецепции и слуховой обработки в раннем постнатальном онтогенезе. Об этом также говорят тенденции изменения таких параметров свистов как: длительность, межсигнальный интервал, диапазон частот и диапазон частот с гармониками, проанализированные с помощью регрессионного анализа, примеры которых показаны на рис. 4, 6. Эти параметры определяют поток энергии звукоизлучающей системы ЧМ-сигналов дельфина. Величина среднего значения интервалов между свистами (рис. 4) в соответствии с моделью простой линейной регрессии имела тенденцию к уменьшению с 3.1 до 2.6 с ($p = 0.001$; $r = 0.183$), что указывает на возрастание потока энергии в результате уменьшения паузы звукоизлучения. Вместе с тем, это указывает на уменьшение времени готовности системы продуцирования ЧМ-сигналов новорожденной для излучения следующего сигнала и, следовательно, на развитие системы зву-

коизлучения. Средние значения частотного диапазона, частотного диапазона с гармониками и длительности свистов (рис. 6), при аппроксимации их моделью простой линейной регрессии, имели тенденцию к увеличению с 5.5 до 10 кГц ($p = 0.002$; $r = 0.121$), с 13 до 30 кГц ($p = 0.007$; $r = 0.195$) и с 0.54 до 0.59 с ($p = 0.005$; $r = 0.191$), соответственно, что также может указывать на развитие системы продуцирования свистов новорожденной.

Наши результаты согласуются с данными работы [3], где было показано, что новорожденные произвольно издавали различные типы свистов, за исключением нескольких типов, таких как возрастающий по частоте (Rise). По мнению авторов, новорожденные в эти ранние периоды жизни практикуются для получения стабильного свиста.

Зубатые киты анализируют ЧМ-сигналы обычным слухом. В то же время “щелчки” ремнезуба (*Mesoplodon densirostris*) и клюворыла кювьера (*Ziphius cavirostris*) являются ЧМ-сигналами [2, 22], поэтому авторы рассматривают возможность слуховой обработки их отражений (эхо) от жертвы с помощью согласованного фильтра со сжатием импульсов. В работах [15–18] обсуждается возможность использования дельфином свистов в качестве зондирующих сигналов его ЧМ-гидролокатора со сжатием импульсов и ЧМ-Доплеровского гидролокатора. Таким образом, дельфин, по-видимому, обрабатывает эхо этих сигналов в согласованном фильтре, который его слуховая система организует для каждого конкретного ЧМ-сигнала, как у летучих мышей. Эхолокационная система летучей мыши использует зондирующие ЧМ-сигналы [24] и др., аналогичные ЧМ-сигналам зубатых китов. Они охватывают тот же частотный диапазон, содержат гармоники, сопоставимы по длительности, их частотные контуры подобны. ЧМ-сигналы широко используются в эхолокационной технике на различных частотах (сонары, радары и лазеры). Для оптимального приема эха ЧМ-сигнала в технике эхолокации используется согласованная фильтрация или корреляционный прием.

Обращают на себя внимание сложные формы акустического поведения новорожденной. Например, на протяжении первой записи она, по-видимому, продуцировала свои ЧМ-сигналы независимо от наличия ЧМ-сигналов родителей (рис. 3). Хотя они пытались продуцировать свисты в паузе от 175 до 205 с – Яна здесь вставила свист с ростом частоты, а Яша издал серию свистов-автографов. Во время паузы с 278 до 322 с Яша продуцировал еще несколько своих свистов-автографов. Однако во время второй записи (рис. 5) новорожденная замолкала каждый раз, когда ее мать продуцировала ЧМ-сигналы и, по-видимо-

му, слушала их. Она возобновляла свисты только тогда, когда мать замолкала. Это повторилось пять раз. Причем во время паузы с 289 до 362 с она, по-видимому, слушала свисты обоих родителей. Но так продолжалось только до 360-х с, после чего она снова продуцировала свисты независимо от наличия ЧМ-сигналов родителей. Этот обмен свистами новорожденная и ее мать совершили в динамичном движении с погружениями, Яша в это время находился у мостков. К сожалению, анализ спектрограмм ЧМ-сигналов ничего не добавил к пониманию этого сложного акустического поведения дельфинов. Но можно предположить, что все дельфины пытались поддерживать контакт с детенышем и друг с другом, как это отмечается и в работах других авторов [29], или показывали свои ЧМ-сигналы друг другу, чтобы оптимизировать правильное продуцирование этих сигналов новорожденной.

Следует отметить, что Яша 41 раз продуцировал свои свисты-автографы (табл. 1), так же, как и Яна 20 раз во время 3-й и 4-й записи. Сложное акустическое поведение дельфинов может свидетельствовать об относительно высоком уровне социального познания у новорожденной с первых дней жизни.

Это исследование выполнено в рамках темы государственного задания (121032300019-0).

Автор выражает благодарность сотрудникам лаборатории биоакустики Карадагской научной станции им. Т.И. Вяземского – природный заповедник РАН, особенно тренерам Светлане Яхно и Надежде Жуковой за неоценимую помощь при проведении исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Au W.W.L.* The sonar of dolphins. New York (NY), 1993.
2. *Johnson M., Madsen P.T., Zimmer W.M.X., Aguilar de Soto N., Tyack P.* Foraging Blainville's beaked whales (*Mesoplodon densirostris*) produce distinct click types matched to different phases of echolocation // *J. Exp. Biol.* 2006. V. 209. P. 5038–5050.
3. *Morisaka T., Shinohara M., Taki M.* Underwater sounds produced by neonatal bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*): I. Acoustic characteristics // *Aquatic Mammals*. 2005. V. 31(2). P. 248–257. <https://doi.org/10.1578/AM.31.2.2005.248>
4. *Reiss D.* Observations on the development of echolocation in young bottlenose dolphins // In: *Animal Sonar: Processes and performance*. Eds. Nachtigall P.E., Moore P.W.B. New York (NY): Plenum Press, 1988. P. 121–127.
5. *Caldwell M.C., Caldwell D.K., Tyack P.L.* Review of the signature-whistle hypothesis for the Atlantic bottlenose dolphin // In: *The bottlenose dolphin: Recent progress in research*. Eds. *Leatherwood S., Reeves R.* San Diego: Academic Press. 1990. P. 199–234.

6. *Smolker R., Mann J., Smuts B.* Use of signature whistles during separations and reunions by wild bottlenose dolphin mothers and infants // Behavioral Ecology and Sociobiology. 1993. V. 33. P. 393–402.
7. *Jones B.L.* The ontogeny of whistle production in infant atlantic bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*) during the first thirty days of life. *Master's Theses*. 2014. 46 p.
8. *Janik V.M., Slater P.J.B.* Context-specific use suggests that bottlenose dolphin signature whistles are cohesion calls // Animal Behavior. 1998. V. 56. P. 829–838.
9. *Janik V.M.* Whistle matching in wild bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*) // Science. 2000. V. 289. P. 1355–1357.
10. *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>
11. *Caldwell M.C., Caldwell D.K.* The whistle of the Atlantic bottlenose dolphin (*Tursiops truncatus*) – ontogeny // In: Behavior of Marine Animals, Cetaceans. Eds. Winn H.E., Olla B.L. New York (NY): Plenum Press, 1979. V. 3. P. 369–401.
12. *Janik V.M., Dehnhardt G., Todt D.* Signature whistle variations in a bottlenosed dolphin, *Tursiops truncatus* // Behavioral Ecology and Sociobiology. 1994. V. 35. P. 243–248.
13. *Sayigh L.S., Tyack P.L., Wells R.S., Scott M.D.* Signature whistles of free-ranging bottlenose dolphins, *Tursiops truncatus*: Stability and mother-offspring comparisons // Behavioral Ecology and Sociobiology. 1990. V. 26. P. 247–260.
14. *Agafonov A.V., Panova E.M.* Individual patterns of tonal (whistling) signals of bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*) kept in relative isolation // Biology Bulletin. 2012. V. 5. P. 430–440.
<https://doi.org/10.1134/S1062359012050020>
15. *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>
16. *Ryabov V.A.* Acoustic signals and echolocation system of the dolphin // Biophysics. 2014. V. 59(1). P. 135–147.
17. *Ryabov V.A.* Hydroacoustical regularities of food behavior of dolphins // Marine Biological J. 2018. V. 3(2). P. 81–97.
<https://doi.org/10.21072/mbj.2018.03.2.07>
18. *Ryabov V.A.* Some aspects of reflection of dolphin FM-signals (Whistles) in an experimental tank // Acoust. Phys. 2019. V. 65(6). P. 750–756.
<https://doi.org/10.1134/S1063771019060125>
19. *Wang D., Würsig B., Evans E.* Whistles of bottlenose dolphins: Comparisons among populations // Aquatic Mammals. 1995. V. 21. P. 65–77.
20. *Buckstaff K.C.* Effects of watercraft noise on the acoustic behavior of bottlenose dolphins, *Tursiops truncatus*, in Sarasota Bay, Florida // Marine Mammal Science. 2004. V. 20. P. 709–725.
21. *May-Collado L.J., Wartzok D.A.* Comparison of bottlenose dolphin whistles in the Atlantic Ocean: Factors promoting whistle variation // J. Mammalogy. 2008. V. 89. P. 1229–1240.
22. *Zimmer W.M.X., Johnson M.P., Madsen P.T., Tyack P.L.* Echolocation clicks of free-ranging Cuvier's beaked whales (*Ziphius cavirostris*) // J. Acoust. Soc. Am. 2005. V. 117. P. 3919–3927.
<https://doi.org/10.1121/1.1910225>
23. *Mercado III E.* The Sonar Model for Humpback Whale Song Revised // Front. Psychol. 2018. V. 9. P. 1156.
<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.01156>
24. *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>
25. *Killebrew D.E., Mercado III E., Herman L.M., Pack A.A.* Sound production of a neonate bottlenose dolphin // Aquatic Mammals. 2001. V. 27. P. 34–44.
26. *Fripp D.* Bubblestream whistles are not representative of a bottlenose dolphin's whistle repertoire // Marine Mammal Science. 2005. V. 21. P. 29–44.
27. *Richardson W.J., Greene C.R., Malme C.I., Thomson D.H.* Marine Mammals and Noise. San Diego: Academic Press, 1995. 576 p.
28. *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.
<https://doi.org/10.1007/s003590000120>
29. *Nakahara F., Miyazaki N.* Vocal exchanges of signature whistles in bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*) // J. Ethol. 2011. 29. P. 309–320.