АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2025, том 71, № 6, с. 881–891

АКУСТИКА ЖИВЫХ СИСТЕМ. БИОМЕДИЦИНСКАЯ АКУСТИКА

УДК 599.537, 534.28

ЩЕЛЧКИ НОВОРОЖДЕННОЙ АФАЛИНЫ (*TURSIOPS TRUNCATES*)

© 2025 г. В. А. Рябов[a,*]

[a] Карадагская научная станция им. Т.И. Вяземского – природный заповедник РАН, филиал ФИЦ "Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН", ул. Науки 24, п. Курортное, Феодосия, 298188 Россия
**e-mail: ryabofff@inbox.ru*

Поступила в редакцию 18.05.2025 г.
После доработки 20.09.2025 г.
Принята к публикации 06.11.2025 г.

Зубатые киты и дельфины продуцируют сложные акустические сигналы. Однако, не ясно как они развиваются и функционируют. В настоящей работе звуки новорожденной афалины (*Tursiops truncatus*) записаны двухканальной системой записи в полосе частот 0.4–220 кГц с динамическим диапазоном 81 дБ и частотой дискретизации 1 МГц, одновременно с видеозаписью ее положения относительно гидрофонов, через 22, 46, 46.5 и 47 ч после рождения. Результаты анализа записей свидетельствуют, что новорожденная продуцировала 20 серий, содержащих 1640 эхолокационных щелчков. При этом она изменяла длительность серий в диапазоне 0.8–7 с, число щелчков в серии от 20 до 280 и межимпульсные интервалы от 6 до 220 мс. При движении вдоль бассейна она смещала положение максимума направленности излучения щелчков в пространстве, и каждый следующий щелчок продуцировала после получения эхо от предыдущего и временной задержки (десятки мс) на обработку эхо. Спектральные и временные характеристики ее щелчков незначительно отличаются от взрослых дельфинов. Видимый уровень источника щелчков (*ASL*) на расстоянии 1 м от новорожденной составлял 188–164 дБ отн. 1 мкПа. Следовательно, способности новорожденной афалины (*Tursiops truncatus*) эхолоцировать, впервые для зубатых китов рассмотренные в настоящей работе, – врожденные, в то время как физиологические, социальные и когнитивные аспекты эхолокации, по-видимому, ей еще предстоит развивать.

Ключевые слова: дельфин афалина (*Tursiops truncatus*), новорожденная, щелчки, серии, форма, спектр, $УЗД_{pp}$

DOI: 10.7868/S3034500625060115

ВВЕДЕНИЕ

Характеристики эхолокационной системы зубатых китов и дельфинов по многим параметрам превосходят лучше технические системы [1]. В связи с этим многочисленные морфологические и функциональные приспособления их эхолокационной системы и слуха к условиям водной среды обитания вызывают научный и практический интерес.

Зондирующие сигналы эхолокатора бутылконосых дельфинов – щелчки – очень короткие, длительностью около 50 мкс, поэтому они широкополосные, охватывают частоты 2–200 кГц с максимумом энергии на частотах около 100–120 кГц [1]. Спектральный максимум энергии щелчков дельфинов совпадает с частотами максимальной чувствительности их слуха (100–120 кГц) [2, 3] и частотами минимальных дифференциальных порогов слуха по частоте [4]. Подобное совпадение характерно и для других видов Odontoceti [5, 6]. Размах – от пика до пика – уровня звукового давления ($УЗД_{pp}$) щелчков зубатых китов изменяется в широком диапазоне от 150 до 245 дБ относительно 1 мкПа [1, 7, 8]. Типичная последовательность эхолокационных щелчков начинается с низких $УЗД_{pp}$, которые возрастают до определенного высокого уровня и в конце уменьшаются. Вместе с тем, $УЗД_{pp}$ щелчков зависит от уровня окружающих шумов, силы цели, дальности цели и решаемой дельфином эхолокационной задачи.

Как правило, дельфин продуцирует щелчок, слушает его отражение от подводного объекта (эхосигнал) и затем излучает следующий щелчок с некоторой задержкой 15–45 мс. Предполагает-

ся, что эта задержка нужна для обработки эхосигнала в слухе дельфина [1]. В связи с этим величина межимпульсных интервалов между щелчками поддерживается на уровне несколько большем времени двойного пути звука до цели, т.е. она определяется дальностью цели и возрастает с дальностью. Поэтому число импульсов и межимпульсный интервал в каждой серии изменяются, обычно в диапазоне от 10 до 300 мс.

Щелчки излучаются в ростральном направлении с шириной характеристики направленности (ХН) в вертикальной и горизонтальной плоскостях около 10–12°, по уровню –3 дБ [1]. Поэтому их форма начинает быстро искажаться и уменьшается относительный уровень высокочастотных составляющих в их спектре при удалении в сторону от оси максимума пространственной направленности излучения этих импульсов. В литературе щелчки описаны в основном в контексте эхолокационного поведения животных.

В многочисленных работах было показано, что дельфины использовали щелчки в качестве зондирующих сигналов для эхолокационного различения, распознавания и классификации подводных объектов [1, 9–15]. При этом щелчки, как дельта-импульсы, вызывают собственные колебания подводных объектов и отражаются от них, и дельфины, анализируя сложные эхосигналы от объектов, успешно решают эти задачи.

В свете теории сигналов щелчки являются ультракороткими сверхширокополосными когерентными акустическими импульсами. Использование дельфинами когерентных зондирующих импульсов предполагает когерентную обработку эхосигналов: когерентное накопление полезного эхо, когерентную компенсацию мешающих отражений, и, следовательно, обработку эхосигналов методом селектора движущихся целей (СДЦ) [16, 17], используемых в технике эхолокации. СДЦ повышает помехозащищенность эхолокационной системы при выделении полезного движущегося эхо на фоне стационарной отраженной помехи за счет взаимного подавления эхосигналов от стационарных мешающих объектов и накопления эхо от полезных движущихся объектов.

В то же время не ясно развитие акустических сигналов и эхолокационной системы Odontoceti. Для понимания этих проблем изучаются акустические сигналы не только взрослых животных, но и новорожденных. Однако до настоящего времени акустические сигналы детенышей дельфинов регистрировались и изучались в работах различных авторов в основном в полосе частот, не превышающей 11–24 кГц [18–21] с динамическим диапазоном около 40дБ.

Цель настоящей работы – изучение характеристик акустических щелчков новорожденной (НР) афалины (*Tursiops truncatus*) в первые дни ее жизни. Основные задачи работы – двухканальная регистрация звуков НР и родителей в полосе частот 0.4–220 кГц с динамическим диапазоном 81 дБ и частотой дискретизации 1 МГц, с одновременной видеозаписью их положения друг относительно друга и гидрофонов I и II каналов записи, а также изучение характеристик записанных акустических сигналов и сопоставление их с НР и родителями.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Материал и метод

НР (новорожденная, ♀) 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". НР родилась 08.06.2015 г. и находилась в бассейне вместе с родителями. Других дельфинов в бассейне не было. Вскоре после рождения НР издавала различные звуки, что было слышно в бассейне невооруженным ухом, когда она проплывала рядом.

Регистрация сигналов

Акустические сигналы дельфинов регистрировались двухканальной системой одновременно с видеозаписью их положения друг относительно друга и гидрофонов I и II каналов записи во время их кормления возле мостков (5) (рис. 1). Двухканальная запись фиксирует не только временную информацию акустического сигнала, но и пространственную информацию о его источнике и направленности, и в этом ее преимущество по сравнению с одноканальной. Расстояние между гидрофонами I и II было выбрано 5 м для получения необходимой межканальной разности временных задержек и амплитуд уровней звуковых давлений (УЗД) каждого канала. При этом гидрофон I располагался ближе к середине бассейна, а гидрофон II ближе к стенке (6).

Запись видео производилась с балкона, расположенного вдоль бассейна, таким образом, что видеокамера располагалась на высоте около 5 м над уровнем воды. НР во время записи обычно плавала вокруг родителей и, соответственно, вокруг гидрофонов (по дуге радиусом 1–5 м). Иногда она заплывала под мостки, иногда в противоположный от мостков и гидрофонов конец бассейна (около 23 м). На рис. 1б показан момент, когда она быстро убегает от родителей, пока они стоят около мостков (5). Яна в этих случаях, через некоторое время (0.5–1 мин), следовала за ней, несколько минут они могли там оставаться, потом вместе возвращались к мосткам (5). Яша во время записи сигналов, как правило, с поднятой

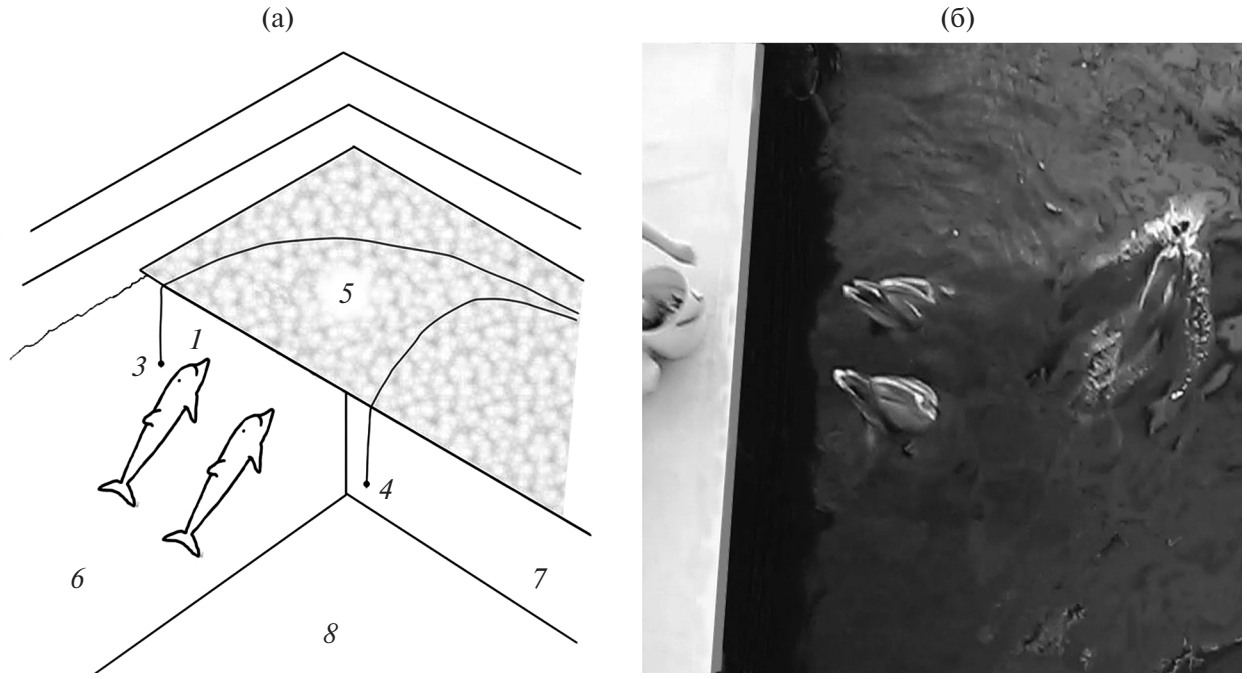

Рис. 1. Конфигурация эксперимента. (а) – Обозначения: *1*, *2* – дельфины “Яша” и “Яна”, соответственно; *3* и *4* – гидрофоны второго (II) и первого (I) канала, соответственно, расположены на расстоянии 5 м друг от друга и глубине 1 м; *5* – мостки, расположены на 0.2 м выше уровня воды; *6*, *7* и *8* – длинная, короткая стенки и дно бассейна, соответственно. Расстояние между гидрофоном (3) и стенкой (6) равно 0.4 м. Расстояние от гидрофонов (3), (4) до стенки (7) равно 3 м. Уровень воды в бассейне 4 м. (б) – Пример видеозаписи положения НР относительно родителей и гидрофонов, во время записи звуков.

над водой головой находился у мостков с тренером в ожидании подкрепления (рис. 1).

Гидрофоны I и II 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 (рис. 1). Неравномерность АЧХ гидрофонов не превышала ±3 дБ на частотах 0.4–160 кГц и ±10 дБ на частотах 0.4–220 кГц. Каждый канал записи сигналов состоял из гидрофона, фильтра верхних частот (0.4 кГц), предусилителя (40 дБ) и одного из каналов многоканального 14-разрядного аналого-цифрового преобразователя (АЦП) USB-3000.

Сигналы дельфинов с I и II каналов регистрации оцифровывал АЦП с частотой дискретизации 1 МГц. С выхода 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 и ограничение акустических сигналов в тракте регистрации могло наступать только при размахе их $УЗД_{рр}$ > 186 дБ отн. 1 мкПа.

Первая запись акустических сигналов дельфинов была сделана примерно через 22 часа после рождения НР, в первой половине дня. Всего было сделано четыре записи акустических сигналов НР и ее родителей одновременно с видеозаписями их положения друг относительно друга и гидрофонов I и II каналов записи, примерно через 22, 46, 46.5 и 47 ч после ее рождения, соответственно. Продолжительность каждой записи около 9 мин, всего около 36 мин.

Анализ данных

При изучении акустических сигналов нескольких дельфинов сложно определить, какое из животных продуцирует тот или иной сигнал. Для определения принадлежности акустического сигнала конкретному дельфину исследователи используют технику записи акустических сигналов с одновременной видеозаписью поведения всех дельфинов. Проанализировав видео, они пытаются определить сигнал по пузырькам воздуха, которые часто исходят от дельфина, продуцирующего сигнал, особенно у новорожденных [20, 22, 23]. Хотя также известно, что не каждый сигнал дельфина сопровождается пузырьками воздуха [24]. В некоторых случаях исследователи помещают дельфинов в отдельные бассейны, чтобы определить сигналы конкретного дельфина. Однако, использование этих методов вызывает определенные трудности и неточности при определении продуцента сигнала.

Учитывая эти проблемы, мы попытались определить щелчки НР с учетом всех доступных нам для анализа данных. Тот факт, что Яша во вре-

мя записей, как правило, располагался у мостков (рис. 1) с поднятой над водой головой, несколько упрощал задачу, т.к. его излучатель щелчков – мелон – был выше уровня воды и он не мог продуцировать щелчки в воду. Поэтому основная задача состояла только в сопоставлении записанных нами серий щелчков НР и Яны.

Известно, что форма щелчков значительно искажается при удалении в сторону от оси максимума направленности их излучения, следовательно, анализ и интерпретация внеосевых щелчков бесперспективны. Поэтому для определения признаков, позволяющих различать щелчки разных дельфинов, при первичном анализе записей мы разработали критерии для выбора щелчков, которые дельфины с наибольшей вероятностью продуцировали вдоль оси максимума направленности их излучения (далее осевые щелчки). Характеристики таких щелчков стереотипны [16, 17]. Для этого мы визуализировали форму всех записанных акустических сигналов и выбрали из них щелчки, отвечающие следующим требованиям: 1 – форма осевого щелчка состоит из максимальных отрицательной и положительной полуволн мгновенного УЗД с минимальной разницей их амплитуд, и хвост с уровнем около –12 дБ и меньше, т.е. щелчки, имеющие форму, подобную рассмотренной в работе [25]; 2 – начальная фаза осевого щелчка – отрицательная полуволна УЗД; 3 – УЗД этих щелчков высокий или не меньший соседних в серии.

Для последующего анализа мы отобрали 14 осевых щелчков НР и 14 осевых щелчков Яны, используя разработанные выше критерии. При этом, качество двухканальной записи акустических сигналов с одновременной регистрацией положения дельфинов друг относительно друга и гидрофонов на видеозаписи позволило нам найти отличия формы и спектров щелчков НР от щелчков ее матери.

Запись, визуализация, количественный и статистический анализ полученных данных выполнены с помощью пакетов программ Power-Graph 3.3.8, Adobe Audition 3.0 и Excel 2016 с пакетом «Анализ данных». Спектры сигналов рассчитаны с использованием быстрого преобразования Фурье на 256 точек с весовой функцией Хэмминга.

Видимый уровень источника щелчков (*ASL*) на расстоянии 1 м от дельфина рассчитан по методу работы [8]:

$$ASL = RL + TL = RL + 20\log R + \alpha R,$$

где *RL* – измеренный или принятый уровень щелчков, с учетом чувствительности гидрофонов и усиления предусилителей, *TL* – потери распространения щелчков, с учетом расстояния *R* от дельфина до гидрофонов и их спектра, коэффициент поглощения звука в воде $\alpha = 0.025$ дБ м$^{-1}$ на частотах $f = 90$ кГц.

Центроид спектра щелчка f_c – частота, которая делит энергию спектра щелчка на две равные половины, – рассчитан по формуле

$$f_c = \left(\sum f_i S_i\right) \Big/ \left(\sum S_i\right),$$

где $S_i(f_i)$ – магнитуда компоненты фильтра анализатора спектра на частоте f_i.

Относительная энергия характерных фрагментов щелчка *E* задается выражением

$$E = \sum P_i^2,$$

где $P_i(t_i)$ – уровни отсчетов звукового давления P_i в моменты времени t_i.

Базу щелчков НР, т.е. произведение длительности щелчка на ширину его спектра *TW*, где *T* – средняя длительность (с) и *W* – средняя ширина спектра щелчка (Гц), мы измерили и рассчитали впервые для зубатых китов в полосе частот 0.4–220 кГц.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Характеристики щелчков НР

Первичный анализ записей показал, что НР и ее мать излучали характерные для дельфинов вида афалина (*Tursiops truncatus*) акустические сигналы – ЧМ свисты, щелчки (рис. 2, 3, 4, табл. 1, 2, 3) и пачки импульсов. При этом свисты – еще не совершенные – НР начала издавать вскоре после рождения и продолжала периодически продуцировать их на протяжении всех записей, в течении дня и ночи [26], тогда как пачки импульсов она излучала реже остальных сигналов.

Вместе с тем мы зафиксировали серии щелчков с заметно более низкими измеренными максимальными УЗД$_{pp}$ (*SL*) и серии с более высокими – на 10–20 дБ уровнями *SL*, при этом форма щелчков одних и других серий выглядит практически одинаковой. Тем не менее, при визуальном анализе записей вначале было трудно понять, по каким признакам можно определить серии щелчков, продуцированные НР, а какие Яной.

Однако после сравнения формы осевых щелчков из разных серий с учетом видеозаписей положения дельфинов относительно гидрофонов стало понятно, что у НР уровни *SL* в сериях щелчков ниже, а форма осевых щелчков и их спектр отличаются от импульсов Яны (рис. 2 и 3, табл. 2). В пользу этого свидетельствуют также несколько серий щелчков НР, которые она продуцировала из дальнего конца бассейна, когда Яна вместе с Яшей находились у мостков с приподнятыми над водой головами (т.е. органами излучения щелчков), рис. 1.

Наиболее характерное различие формы щелчков НР и Яны видно в области 30 мкс (рис. 2а, 2б),

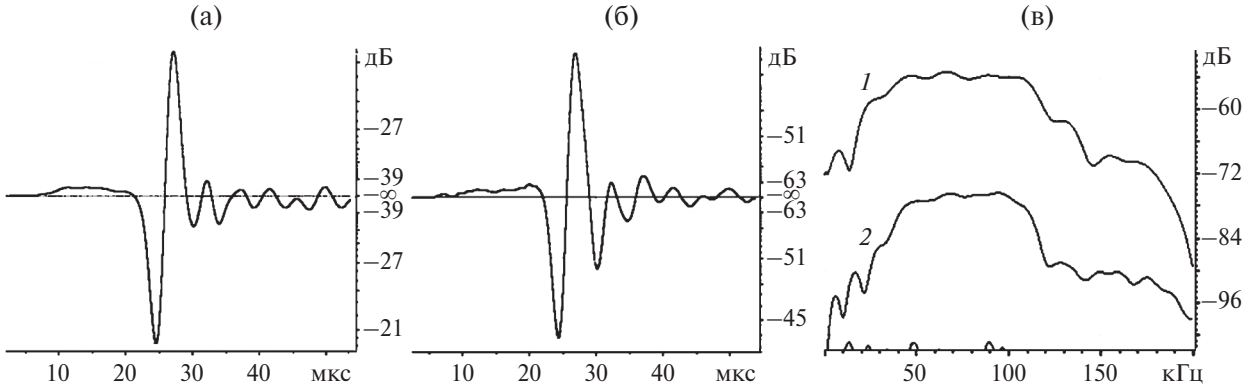

Рис. 2. Характерная форма осевых щелчков (а) – Яны (2:27.54, 4-я запись), (б) – НР (2:32,59, 4-я запись, 1-я серия, табл. 1) и (в) – их спектры 1 и 2, соответственно (результат визуального анализа щелчков, соответствующих критериям максимума направленности их излучения). Ширина спектра по уровню –6дБ импульса Яны (в, кривая 1) 93 кГц (25–118 кГц) и НР (в, кривая 2) 74 кГц (38–112 кГц).

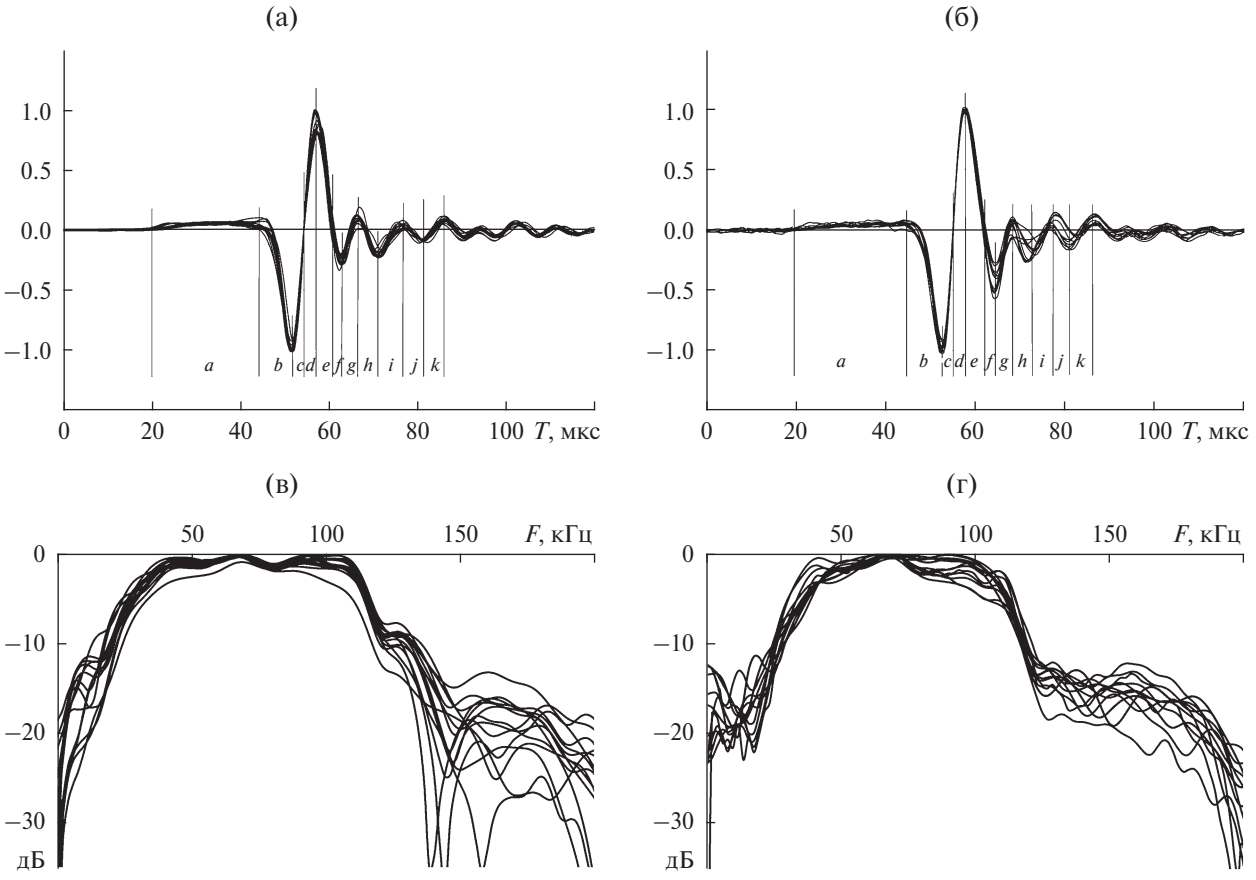

Рис. 3. Формы выбранных из 4-й записи (табл. 1) (а) – 14 осевых щелчков Яны и (б) – 14 осевых щелчков НР, и (в, г) – их амплитудные спектры – нормализованы и совмещены, соответственно. Формы щелчков (а и б) совмещены относительно их центра (точка перехода через ноль их мгновенного УЗД, от максимального отрицательного к максимальному положительному уровню). Символами *a, b, …, k* обозначены характерные временные интервалы между экстремумами положительных, отрицательных и нулевых мгновенных значений УЗД щелчков, значения которых показаны в табл. 2.

где амплитуда отрицательной полуволны мгновенного УЗД$_{рр}$ НР на 6 дБ меньше максимальной амплитуды щелчка, тогда как у Яны амплитуда отрицательной полуволны меньше на 17 дБ. Вместе с тем ширина спектра щелчков НР заметно уже, чем у Яны. Наличие этих признаков позволило однозначно отличать осевые щелчки каждого из этих дельфинов и в соответствии с ними серии их щелчков.

Таблица 1. Параметры записанных серий щелчков НР

№№ Запись / серия	Время продуцирования серии щелчков в записи, мин:с	Число щелчков/длительность серии, с	Интервалы между щелчками в серии, мс	*SL* в дБ отн. 1000 Па	*ASL*, дБ отн. 1 мкПа/м
1/1	0:34.1–0:35.1	38/1.05	16–62	–36...–60	
1/2	0:36.5–0:37.6	32/1.1	24–56	–39...–48	
1/3	0:38.6–0:42.2	280/3.6	6–129	–33...–63	
1/4	1:03.7–1:04.5	23/0.8	34–46	–27...–39	
2/1	0:10.6–0:12.7	61/2.1	30–64	–40...–51	
2/2	1:36.9–1:39.7	42/2.8	116–49	–48...–58	
2/3	2:08.5–2:12.2	58/3.7	91–54	–46...–60	
2/4	3:46.4–3:52.2	126/5.8	99–36	–46...–66	
2/5	3:55.6–3:57.5	59/1.9	80–23	–50...–63	
2/6	4:10.3–4:16.8	222/6.3	157–19	–32...–60	
3/1	3:25.5–3:27.4	23/1.9	155–62	–35...–60	
3/2	3:44.4–3:46	20/1.6	133–64	–44...–60	
3/3	5:42.5–5:45.5	43/3	99–54	–48...–57	
4/1	2:31.1–2:34.5	89/3.5	124–23		188–164
4/2	2:50.8–2:56.6	110/5.8	220–28		185–158
4/3	4:17.1–4:21.2	69/4	160–44		182–164.5
4/4	5:36.8–5:38.9	37/2.1	78–51		178–164.5
4/5	5:51.1–5:56.2	80/7	74–33		176–161.5
4/6	6:17.2–6:23.3	190/5.8	47–30		176–158.5
4/7	6:41.7–6:42.7	38/1	39–29		173–158.5
		1640/64.8	6–220		188–158

Примечание. Серии щелчков 4/1 и 4/2 НР продуцировала, двигаясь в направлении центрального гидрофона от середины бассейна, при этом расстояние до гидрофона уменьшалось с 9 до 6 м и с10 до 3 м, соответственно. Серии 4/3–4/7 НР продуцировала, находясь в дальнем от гидрофонов конце бассейна (15–20 м до гидрофона). *SL* – измеренные $УЗД_{рр}$ в дБ отн. 1000 Па, *ASL* – видимый $УЗД_{рр}$ пересчитанный к расстоянию 1 м от дельфина.

Таблица 2. Длительность средних значений характерных временных интервалов *a, b, . . ., k,* между экстремумами положительных, отрицательных, и нулевых мгновенных значений $УЗД_{рр}$ щелчков НР и Яны (рис. 3а, 3б), и их относительная разница в %

	a	*b*	*c*	*d*	*e*	*f*	*g*	*h*	*i*	*j*	*k*
НР, мкс	23.3	6.0	2.5	2.7	4.5	2.2	3.8	4.0	4.5	3.7	5.0
Яна, мкс	24.3	7.2	2.6	2.8	3.9	2.1	3.3	4.4	5.7	4.9	4.4
%	–4.1	–16.7	–3.9	–3.6	15.4	4.8	15.2	–9.1	–21.1	–24.5	13.6

Характерные различия средней формы и среднего спектра щелчков НР и Яны показаны на рис. 3 (видны как более широкая и более темная полоса наложения серых линий каждого щелчка). Здесь же впервые для зубатых китов показано, что у щелчков НР и матери различаются характерные временные интервалы медленного начала импульсов *a*, содержащих около 1% относительной энергии щелчков, областей, в которых сосредоточено 95% энергии щелчков, – *b–c–d–e–f*, а также хвостов импульсов *g–h–i–j–k,* содержащих около 4% их энергии (рис. 3а, 3б, табл. 2), что указывает на тонкие различия их формы. Об этом же свидетельствует и различие средних значений суммарных длительностей интервалов *b–c–d–e* – отрицательной и положительной по-

луволн мгновенных УЗД$_{pp}$ щелчков НР и Яны, составляющее 15.7 и 16.5 мкс, соответственно. Средние значения длительностей щелчков НР и Яны от начала временного интервала *a* до конца интервала *k* также различаются и составляют 62.3 мкс и 65.7 мкс, соответственно. Рассмотренные результаты свидетельствуют, что перед нами две различных стереотипных формы щелчков, вплоть до хвостов каждого щелчка (рис. 2, 3, табл. 2, 3).

Результаты двухвыборочного *t*-Test для независимых выборок с различными дисперсиями, при уровне значимости $\alpha = 0.05$, также свидетельствуют о значительном различии: ширины спектров щелчков Яны и НР по уровню −3 дБ ($t = 4.0$, $p < 0.0001$; $t = -6.0$, $p < 0.0001$) и по уровню −10 дБ ($t = 8.6$, $p < 0.0001$; $t = -2.5$, $p < 0.0003$), нижней и верхней границы спектра по уровню −3 дБ ($t = 4.6$, $p < 0.0001$; $t = -3$, $p < 0.009$; и $t = 7.1$, $p < 0.0001$; $t = 5.1$, $p < 0.0001$) и по уровню −10дБ ($t = 3.4$, $p < 0.0001$; $t = -2.5$, $p < 0.0001$; и $t = 7.4$, $p < 0.0001$; $t = -5.5$, $p < 0.0001$), а также центроидов спектра щелчков f_c($t = 3.6$, $p < 0.0001$; $t = 8.0$, $p < 0.0001$), соответственно (табл. 3).

Следовательно, в настоящей работе впервые для зубатых китов записаны 1640 эхолокационных щелчков (20 серий) НР афалины (*Tursiops truncatus*) двухканальной системой записи, в диапазоне частот 0.4–220 кГц с динамическим диапазоном 81 дБ и частотой дискретизации 1 МГц, примерно через 22, 46, 46.5 и 47 ч после ее рождения, соответственно (рис. 2, 3, 4, табл. 1).

Характеристики серий щелчков НР

Рассмотрим 2-ю серию щелчков НР, зарегистрированную нами в четвертой записи (рис. 4, табл. 1, 4/2), которые она продуцировала, когда плыла рядом с Яной (на расстоянии около 1.5 м с правого бока), от середины бассейна по направлению к мосткам, при этом расстояние до гидрофонов уменьшалось от 10 до 3 м. Здесь мы видим существенное изменение амплитуд УЗД каждого из щелчков этой серии между I и II каналами – до 20–30 дБ, что указывает на соответствующее перемещение ею максимума направленности их излучения в пространстве, при движении к гидрофонам.

Из соотношения амплитуд щелчков между каналами записи следует, что в начале серии максимум направленности излучения щелчков НР расположен между гидрофонами I и II канала записи – ближе к I каналу (до момента t = 2:51.6), затем (с t = 2:51.6 по t = 2:52.6) на гидрофоне I канала, после этого (с t = 2:52.7 по t = 2:54.1) – ближе к гидрофону II канала, и снова на гидрофоне I канала (с t = 2:54.3 до конца серии).

Вместе с тем, заметно менее существенное уменьшение максимальных измеренных УЗД$_{pp}$ ее щелчков с −25 дБ до −39 дБ относительно 1000 Па, соответственно (рис. 4), что можно объяснить необходимостью компенсации возрастающего уровня эхо от стенки (7) на рис. 1, по мере ее приближения к гидрофонам.

В то же время разница УЗД$_{pp}$ осевого щелчка (рис. 4, t = 2:51.8) между I и II гидрофонами, которые в этот момент ей видны на угловом

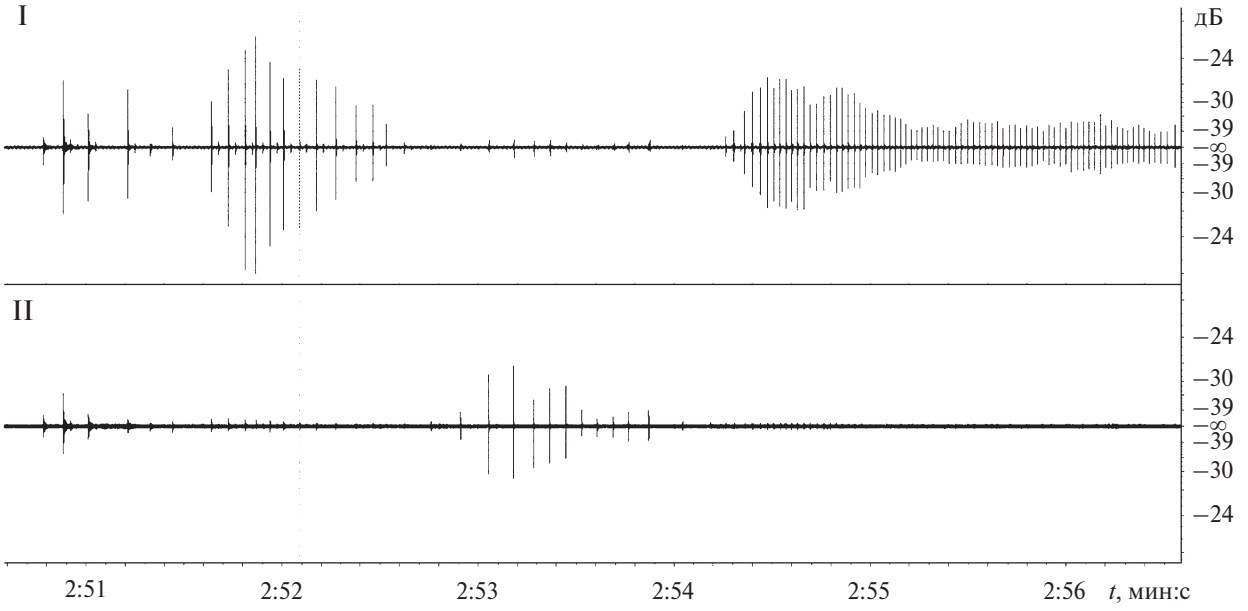

Рис. 4. Изменение УЗД$_{pp}$ 4/2 серии щелчков НР (табл. 1) между I и II каналами записи при ее приближении к мосткам 5 (рис. 1), с 10 м (2:50,6) до 3 м (2:56,6). Ось X – время от начала четвертой записи, мин:с. Ось Y – измеренный УЗД$_{pp}$ в дБ относительно 1000 Па в области гидрофонов (рис. 1).

расстоянии между ними около 27–30°, – не менее 20 дБ – дает нам оценку направленности излучения щелчков НР в горизонтальной плоскости. Полученная оценка согласуется с результатами измерения направленности их излучения у взрослых дельфинов [27].

По мере движения НР к гидрофонам межимпульсные интервалы между ее щелчками уменьшаются от 220 мс в начале серии до 28 мс в конце этой серии. При этом рассчитанное время двойного пути звука от нее до гидрофонов изменялось от 27 до 4 мс и, следовательно, межимпульсные интервалы между ее щелчками на всем пути были существенно больше времени двойного пути звука до цели. Таким образом, каждый следующий импульс она продуцировала, по-видимому, после приема и обработки эхо от предыдущего, что согласуется с [1].

Всего на протяжении четырех записей (табл. 1) было зарегистрировано 20 серий эхолокационных щелчков НР, содержащих 1640 щелчков. При этом, она в широком диапазоне изменяла: длительность серий от 0.8 с до 7 с, число щелчков в серии от 20 до 280 и межимпульсные интервалы между щелчками от 6 до 220 мс, что согласуется с этими параметрами для взрослых дельфинов [1].

Интересно, что Яна, двигаясь рядом с НР, редко продуцировала серии щелчков и, по-видимому, подслушивала эхо щелчков НР, проверяя и возможно корректируя правильность их использования НР, подобно [28].

ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты анализа записи акустических сигналов, выполненной через 22 ч после рождения самки дельфина афалина (*Tursiops truncatus*), свидетельствуют о том, что она в это время и, по-видимому, сразу после рождения, продуцировала серии щелчков, так же как ЧМ-свисты [26] и пачки импульсов. Полученный результат согласуется с данными [20, 22, 23, 29], подтверждающими продуцирование новорожденными дельфинами (*Tursiops truncatus*) импульсных звуков сразу после рождения в условиях неволи, а также с результатами работы [30], в которой дельфин белуха (*Delphinapterus leucas*) продуцировал серии щелчков сразу же после рождения. Таким образом, можно полагать, что способность производить функциональные гидролокационные серии щелчков у них врожденная [31].

При этом форма щелчков НР на первый взгляд не отличается от формы щелчков ее матери и взрослых дельфинов. По крайней мере, при визуальном анализе сразу было трудно понять, по каким признакам можно отделить серии щелчков, продуцированные НР, от щелчков Яны. Однако анализ их осевых щелчков из разных серий с учетом видеозаписей положения дельфинов относительно гидрофонов показал, что у НР форма осевых щелчков и их спектр несколько отличаются от импульсов Яны (рис. 2, 3). Наибольшее различие формы щелчков НР и Яны (рис. 2) заметно в области 30-й мкс, где амплитуда отрицательного экстремума мгновенного УЗД у НР примерно на 6 дБ меньше максимального, тогда как у Яны эта разница около 17 дБ. На протяжении серии щелчков НР уровень этого экстремума их формы может изменяться, однако остается заметно большим, чем у Яны (рис. 2, 3).

Вместе с тем, впервые для зубатых китов показано, что характерные временные интервалы щелчков НР и Яны различаются в области медленного начала импульсов *a*, содержащего около 1% относительной энергии импульсов, а также в области, где сосредоточено 95% относительной энергии щелчков – *b*–*c*–*d*–*e*–*f*, и в области их хвостов – *g*–*h*–*i*–*j*–*k*, содержащих около 4% энергии (рис. 3а, 3б, табл. 2).

Наряду с этим, средние значения суммарных длительностей интервалов *b*–*c*–*d*–*e* отрицательной и положительной полуволн мгновенных УЗД щелчков Яны и НР – 16.5 и 15.7 мкс – различаются, также как и средние значения длительностей их щелчков – от начала временного интервала *a* до конца интервала *k* – 65.7 и 62.2 мкс, соответственно.

Учитывая, что для более точного измерения формы сигнала на физическом уровне и его восстановления по совокупности выборок, частоту семплирования увеличивают в 3–4 раза выше частоты Найквиста, полученные в настоящей работе результаты также указывают на то, что высокая частота семплирования (1 МГц) имеет значение для более точной регистрации формы и тонких различий характеристик коротких щелчков дельфинов.

Результаты двухвыборочного *t*-Test для независимых выборок с различными дисперсиями, при уровне значимости $\alpha = 0.05$, также свидетельствуют о значительном различии: ширины спектров щелчков Яны и НР по уровню –3 дБ ($t = 4.0$, $p < 0.0001$; $t = -6.0$, $p < 0.0001$) и по уровню –10 дБ ($t = 8.6$, $p < 0.0001$; $t = -2.5$, $p < 0.0003$), нижней и верхней границы спектра по уровню –3 дБ ($t = 4.6$, $p < 0.0001$; $t = -3$, $p < 0.009$; и $t = 7.1$, $p < 0.0001$; $t = 5.1$, $p < 0.0001$) и по уровню –10 дБ ($t = 3.4$, $p < 0.0001$; $t = -2.5$, $p < 0.0001$; и $t = 7.4$, $p < 0.0001$; $t = -5.5$, $p < 0.0001$), а также центроидов спектра щелчков f_c ($t = 3.6$, $p < 0.0001$; $t = 8.0$, $p < 0.0001$), соответственно (табл. 3).

Тот факт, что нижняя граница спектра щелчков НР заметно выше щелчков матери (рис. 2, 3, табл. 3), по-видимому, определяется меньшими размерами дельфина, ее органов излучения и головы. В то же время, увеличенная амплитуда отрицательной полуволны щелчков НР в области 30-й мкс (рис. 2, 3), по-видимому, может рассматриваться как недостаточное развитие в это время

Таблица 3. Средние значения параметров щелчков НР и Яны, зарегистрированных в настоящей работе

Параметры щелчков	НР	Яна
Длительность[a] *t*, мкс	11.5	12.1
Длительность[b] *t*, мкс	15.7	16.5
ASL[c], дБ отн. 1мкПа м	188–164	199–183
Нижняя граница спектра, кГц, по уровню –3дБ	39.4	33.3
Нижняя граница спектра, кГц, по уровню –10дБ	26.5	20.1
Верхняя граница спектра, кГц, по уровню –3дБ	105.4	112.2
Верхняя граница спектра, кГц, по уровню –10дБ	118.9	128.2
Ширина спектра, кГц, по уровню –3дБ	65.9	78.8
Ширина спектра, кГц, по уровню –10дБ	92.4	108.1
Центроид спектра, кГц	76.1	70.1
База[d] *TW*, по уровню –3дБ	1.1	1.3
База[d] *TW*, по уровню –10дБ	1.4	1.8

Примечания. **a** – Длительность щелчка, определенная по уровню –10дБ его огибающей. **b** – Длительность щелчка, определенная суммой временных интервалов основного колебания (рис.3а, 3б, *b*–*c*–*d*–*e*, табл. 2), содержащего 95% его энергии. **c** –пересчитанный к расстоянию 1 м от дельфина видимый уровень источника щелчков *ASL*. **d** – *TW* – произведение средней длительности щелчков *T* на среднюю ширину их спектра *W*.

механизма демпфирования колебательного процесса органов генерации ее щелчков.

Впервые для зубатых китов, мы измерили в настоящей работе размах $УЗД_{pp}$ щелчков НР и рассчитали видимый уровень источника *ASL* щелчков НР и ее матери с учетом расстояния от дельфина до гидрофона – 188–152 и 199–183 дБ относительно 1 мкПа на расстоянии 1 м от дельфина, соответственно (табл. 1, 3). Эти результаты свидетельствуют о том, что НР на протяжении записей продуцировала щелчки с УЗД заметно ниже, чем Яна.

Однако, несмотря на то, что максимальный размах $УЗД_{pp}$ щелчков НР на протяжении записей был на 34 дБ (в 51 раз) меньше максимального возможного размаха $УЗД_{pp}$ для этого вида дельфинов 228 дБ отн. 1 мкПа [3, 9], он, по-видимому, был достаточным для выполнения ею актуальных эхолокационных задач.

К сожалению, нет работ, с которыми можно сравнить форму щелчка НР. В большинстве известных работ авторы лишь качественно описывают эхолокацию у новорожденных бутылконосых дельфинов (*Tursiops truncatus*) как наличие слышимой импульсации и сканирующих движений головой, при этом они регистрировали звуки в основном в полосе частот только до 11–24 кГц [20–23].

В то же время, тот факт, что характеристики щелчков НР и матери, показанные в настоящей работе, различаются, согласуется с данными работы [32], в которой щелчки новорожденных франциканских дельфинов (*Pontoporia blainvillei*) отличаются от щелчков молоди и диких особей. Эти дельфины продуцируют узкополосные высокочастотные (NBHF) щелчки с принципиально другими характеристиками, чем у бутылконосых дельфинов, однако их новорожденные имеют щелчки с более широким спектром частот и более высокими пиковыми частотами по сравнению с молодыми и дикими особями. Это может свидетельствовать об отличии щелчков новорожденных от взрослых особей у всех зубатых китов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в настоящей работе результаты, касающиеся характеристик щелчков НР афалины (*Tursiops truncatus*) и динамики изменения серий ее эхолокационных щелчков в первые дни после рождения, указывают на сознательное использование ею эхолокатора. Следовательно, способности НР эхолоцировать, впервые для зубатых китов рассмотренные в настоящей работе, – врожденные.

Однако, учитывая, что эхолокация это сложный процесс и, по-видимому, определяется не только способностью дельфина продуцировать серии щелчков и правильно манипулировать их характеристиками, очевидно, что физиологические, социальные и когнитивные аспекты эхолокации, не рассмотренные в настоящей работе, новорожденной еще предстоит развивать.

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета КНС-ПЗ РАН, филиала ФИЦ “Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН”, в рамках темы

НИР № 124052000059-4. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Все исследования проводились в соответствии с принципами биомедицинской этики, изложенными в Хельсинкской декларации 1964 г. и последующих поправках к ней. Они также были одобрены Этическим комитетом Санкт-Петербургского университета (Санкт-Петербург), протокол № 115-02-2 от 06.04.2022.

Автор выражает благодарность сотрудникам лаборатории морских млекопитающих ФГБУН Карадагская научная станция им. Т.И. Вяземского – природный заповедник РАН, филиал ФГБУН ФИЦ "Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН" и особенно тренерам С. Яхно и Н. Жуковой за неоценимую помощь при выполнении работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Au W.W.L.* Sonar of Dolphins. New York: Springer, 1993.
2. *Бабушина Е.С.* Звуковая рецепция морских млекопитающих в зависимости от параметров и путей проведения звука // Биофизика. 2000. Т. 45. Вып. 5. С. 927–934.
3. *Рябов В.А., Заславский Г.Л.* Помехозащищенность эхолокатора дельфина // Сенсорные системы. 1998. Т. 12. № 2. С. 202–209.
4. *Белькович В.М., Борисов В.И.* Локационное распознавание дельфинами фигур сложной конфигурации // Тр. Акуст. инст. М., 1971. Т. 17. С. 19–23.
5. *Au W.W.L.* Echolocation signals of Atlantic bottlenose dolphin (*Tursiops truncatus*) in open waters // Animal sonar systems. Eds. Busnel R., Fish J. New York: Plenum press, 1980. P. 251–282.
6. *Bibikov N.G.* Auditory brainstem responses in the harbor porpoise (Phocoena phocoena) // Marine mammal sensory systems. Eds. Thomas J., Kastelein R., Supin A. New York: Plenum Press, 1992. P. 197–211.
7. *Madsen P.T., Wahlberg M., MØhl B.* Male sperm whale (*Physeter macrocephalus*) acoustics in a high-latitude habitat: implications for echolocation and communication // Behav. Ecol. Sociobiol. 2002. V. 53. P. 31–41. https://doi.org/10.1007/s00265-002-0548-1
8. *Wahlberg M., Jensen F.H., Aguilar de Soto N., Beedholm K., Bejder L., Oliveira C., Rasmussen M., Simon M., Villadsgaard A., Madsen P.T.* Source parameters of echolocation clicks from wild bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus and T. aduncus*) // J. Acoust. Soc. Am. 2011. V. 130. No. 4. P. 2263–2274. https://doi.org/10.1121/1.3624822
9. *Айрапетьянц Э.Ш., Константинов А.И.* Эхолокация в природе. Л.: Наука, 1974. 512 с.
10. *Белькович В.М., Дубровский Н.А.* Сенсорные основы ориентации китообразных. Л.: Наука, 1976. 204 с.
11. *Голубков А.Г.* Гидролокатор дельфина. Л.: Судостроение, 1977. 96 с.
12. *Заславский Г.Л., Титов А.А., Лекомцев В.М.* Исследование гидролокационных способностей дельфина азовки // Тр. Акуст. инст. М., 1969. № 8. С. 134–138.
13. *Au W.W.L., Pawloski J.L.* Cylinder wall thickness difference discrimination by an echolocating atlantic bottlenose dolphin // J. Comp. Physiol. A. 1992. № 72. P. 41–47.
14. *Evans W.W., Powell B.A.* Discrimination of different metallic plates by an echolocating delphinid // Animal Sonar Systems: Biology and Bionics. Ed. Busnel R.G. Laboratoire de Physiologie Acoustique, Jouy-en-Josas, 1967. V. 1. P. 363–382.
15. *Nachtigall P.E.* Odontocete echolocation performance on object size, shape and material // Animal Sonar Systems. Eds. Busnel R.G., Fish J.F. New York: Plenum Press, 1980. P. 71–95.
16. *Ryabov V.A.* Some aspects of analysis of dolphins' acoustical signals // Open J. of Acoustics. 2011. V. 1. P. 41–54. https://doi.org/10.4236/oja.2011.12006
17. *Ryabov V.A.* Acoustic signals and echolocation system of the dolphin // Biophysics. 2014. V. 59(1). P. 135–147. https://doi.org/10.1134/S0006350914010199
18. *Caldwell M.C., Caldwell D.K., Tyack P.L.* A review of the signature whistle hypothesis for the Atlantic bottlenose dolphin, Tursiops truncates / The bottlenose dolphin: Recent progress in research. Eds. Leatherwood S., Reeves R. San Diego: Academic Press, 1990. P. 199–234.
19. *Tyack P.L., Sayigh L.S.* (1997). Vocal learning in cetaceans / Social influences on vocal development. Eds. Snowden C., Hausberger M. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1997. P. 208–233.
20. *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
21. *Bebus S.E., Herzing D.L.* Mother-Offspring Signature Whistle Similarity and Patterns of Association in Atlantic Spotted Dolphins (*Stenella frontalis*) // Animal Behavior and Cognition. 2015. V. 2(1). P. 71–87. https://doi.org/10.12966/abc.02.06.2015
22. *Reiss D.* Observations on the development of echolocation in young bottlenose dolphins / Animal Sonar: Processes and performance. Eds. Nachtigall P.E., Moore P.W.B. New York, NY: Plenum Press, 1988. P. 121–127.
23. *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.
24. *Fripp D.* Bubblestream whistles are not representative of a bottlenose dolphin's whistle repertoire // Marine Mammal Science. 2005. V. 21. P. 29–44.
25. *Finneran J.J., Branstetter B.K., Houser D.S., Moore P.W., Mulsow J., Martin C., Perisho S.* High-resolution measurement of a bottlenose dolphin's (*Tursiops truncatus*) biosonar transmission beam pattern in the horizontal plane // J. Acoust. Soc. Am. 2014. V. 136. P. 2025. https://doi.org/10.1121/1.4895682
26. *Рябов В.А.* Некоторые особенности ЧМ-сигналов (свистов) новорожденной Черноморской афалины (Tursiops Truncatus) // Акуст. журн. 2022. Т. 68. № 3. С. 336–346.

27. *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. https://doi.org/10.1121/1.3676694
28. *Gregg J.D., Dudzinski K.M., Smith H.V.* Do Dolphins Eavesdrop on the Echolocation Signals of Conspecifics? // Int. J. Comparative Psychology. 2007. V. 20(1). P. 65–88. https://escholarship.org/uc/item/20s5h7h9
29. *Gnone G., Moriconi T.* Use and function of distinctive whistle-like signals in bottlenose dolphin (*Tursiops truncatus*) mother-calf pair / Dolphins: Anatomy, behavior and threats. Animal science, issues and professions. Eds. Perace A.G., Corea L.M. New York: Nova Science Publishers, 2010. P. 149–167.
30. *Castellote M., Vergara V., Barrett-Lennard L.G., Esteban J.A.* Sound production of neonate captive beluga whales. Proc. of the 21st Conf. of the European Cetacean Society. San Sebastian, Spain, 2007.
31. *Harder J.H., Hill H.M., Dudzinski K.M., Sanabria K.T., Guarino S., Kuczaj S.A.* II. The development of echolocation in bottlenose dolphins (Tursiops truncatus) // Int. J. Comparative Psychology. 2016. V. 29. P. 1–19.
32. *Giardino G.V., Cosentino M., Macchi A.C., Loureiro J.P., Heredia S.R., Alvarez K.C., Moron S.G., Rodriguez D.H.* Detailed Comparison of Acoustic Signals from Rehabilitated and Wild Franciscanas (*Pontoporia blainvillei*) Dolphins // Animals. 2024. V. 14(16). P. 2436. https://doi.org/10.3390/ani14162436

THE CLICKS OF THE NEWBORN BOTTLENOSE DOLPHIN (*TURSIOPS TRUNCATES*)

V. A. Ryabov[a,*]

[a] *Vyazemsky Karadag Scientific Station — Nature Reserve of the Russian Academy of Sciences, Branch of the Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas, Russian Academy of Sciences, Feodosia, 298188 Russia*
**e-mail: ryabofff@inbox.ru*

Toothed whales and dolphins produce complex acoustic signals. However, how they develop and function is unclear. In this study, the sounds of a newborn (NB) bottlenose dolphin (*Tursiops truncatus*) were recorded by a dual-channel recording system in the frequency band 0.4–220 kHz with a dynamic range of 81 dB and a sampling frequency of 1 MHz, simultaneously with video recording of its position relative to hydrophones, 22, 46, 46.5 and 47 h after birth. The results of the analysis of the recordings indicate that the NB produced 20 series containing 1640 echolocation clicks. In doing so, it varied the duration of series in the range of 0.8–7 s, the number of clicks in a series from 20 to 280 and the interpulse intervals from 6 to 220 ms. When moving along the pool, it shifted the position of the maximum of the click radiation direction in space, and each subsequent click was produced after receiving an echo from the previous one and a time delay (tens of ms) for echo processing. The spectral and temporal characteristics of its clicks differ slightly from those of adult dolphins. The apparent sours level of clicks (ASL) at a distance of 1 m from the NB was 188–164 dB relative to 1 μPa. Consequently, the abilities of the NB of the bottlenose dolphin (*Tursiops truncatus*) to echolocate, considered for the first time for toothed whales in this paper, are innate, while physiological, social and cognitive aspects of echolocation, not considered in this paper apparently still have to develop.

Keywords: bottlenose dolphin (*Tursiops truncatus*), newborn, clicks, series, shape, spectrum, SPL