

## АКУСТИЧЕСКИЕ СИГНАЛЫ И ЭХОЛОКАЦИОННАЯ СИСТЕМА ДЕЛЬФИНА

© 2014 г. В.А. Рябов

Карадагский природный заповедник НАН Украины, 334876, Феодосия, Курортный район, Крым, Украина

E-mail: ryaboff@ukr.net

Поступила в редакцию 10.12.12 г.

После последней доработки 24.10.13 г.

Двухканальная регистрация акустических сигналов двух квазистационарных дельфинов дала основания полагать, что эхолокационная система дельфина более сложна, чем это обсуждалось ранее, и имеет по меньшей мере четыре сонара. В работе продолжены двухканальная регистрация, анализ и интерпретация функций акустических сигналов двух квазистационарных дельфинов с точки зрения физической акустики, теории сигналов и эхолокации. Полученные результаты указывают на то, что эхолокационная система дельфина имеет четыре органа, продуцирующие пять различных типов зондирующих сигналов, предполагающих различные механизмы обработки эхосигналов в слуховой системе дельфина, соответствующих шести различным типам сонаров. Результаты работы имеют значение для изучения эхолокационной системы *Odontoceti* и совершенствования эхолокационной техники.

*Ключевые слова:* дельфин, сонар, акустический, эхо, сигнал, направленность, пачка импульсов, радиолокатор.

Эхолокатор дельфина исследуется с шестидесятых годов прошлого века. К настоящему времени изучены способности дельфина к эхолокационному различению, распознаванию и классификации подводных объектов [1–10]. В качестве зондирующих сигналов эхолокатора авторы рассматривали короткие стереотипные акустические импульсы дельфина (длительностью около 0,05 мс) с широким спектром частот (2–200 кГц), так называемые «щелчки». Как правило, каждый следующий «щелчок» дельфин излучал после того, как получал эхо от предыдущего плюс дополнительный период (15–45 мс), необходимый для обработки эха. Было также показано, что при продуцировании и формировании направленного излучения «щелчков» важную роль играют правый тубулярный мешок, лобно-жировой выступ и кости черепа дельфина [11–15]. Другие акустические сигналы дельфина – «свисты» и пачки импульсов – рассматривались в основном в качестве коммуникационных сигналов [16–26].

Однако двухканальная регистрация акустических сигналов двух квазистационарных дельфинов дает основания полагать, что эхолокационная система дельфина и, по-видимому, *Odontoceti*, более сложна, чем это обсуждалось

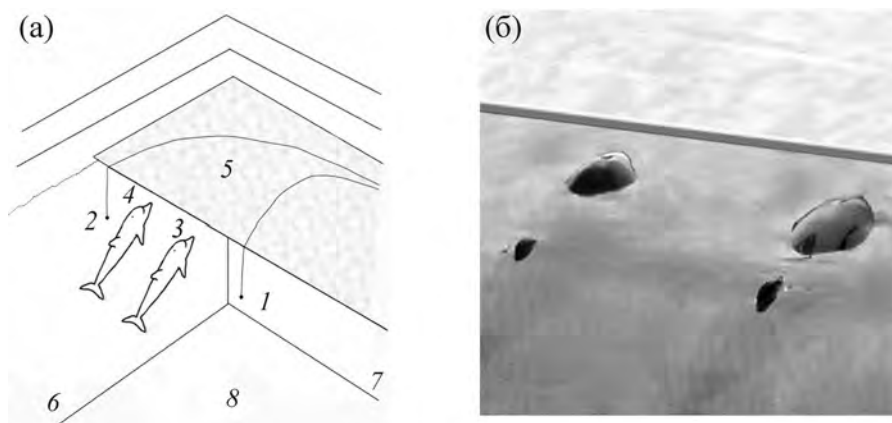
ранее, и имеет по меньшей мере четыре сонара разных типов [27]. Каждый сонар, видимо, имеет соответствующий орган, продуцирующий соответствующий тип зондирующих сигналов независимо («щелчки», пачки некогерентных импульсов, пачки когерентных импульсов, «свисты»), что предполагает соответствующий им метод обработки эхосигналов. Вследствие этого характеристики акустических сигналов дельфина определены их функциональностью и оптимальны с точки зрения современного состояния физической акустики.

В настоящей работе продолжено изучение характеристик и возможных функций акустических сигналов дельфина с точки зрения эхолокации, физической акустики и теории сигналов. Конкретные задачи работы – регистрация и последующий анализ акустических сигналов двух квазистационарных дельфинов одного вида двухканальной системой в полосе частот 0,1–220,0 кГц в условиях бассейна.

### МЕТОДИКА

Эксперимент проводили с двумя взрослыми черноморскими дельфинами (*Tursiops truncatus* p.) с кличками «Яша» (самец) и «Яна» (самка), в закрытом бетонном бассейне размерами 23 × 9 × 4,5 м Карадагского природного заповедника

Сокращение: АЦП – аналого-цифровой преобразователь, УЗД – уровень звуковых давлений.



**Рис. 1.** Конфигурация эксперимента. (а) – 1 и 2 – гидрофоны первого (I) и второго (II) канала соответственно расположены на расстоянии 3,5 м друг от друга и глубине 1 м; 3, 4 – дельфины Яна и Яша соответственно. Расстояние между дельфинами около 1 м; 5 – мостки, расположены на 0,1 м выше уровня воды; 6, 7 и 8 – длинная, короткая стенки и дно бассейна соответственно. Расстояние между гидрофоном (2) и стенкой (6) 0,3 м. Расстояние от гидрофонов (1, 2) до стенки (7) 3 м. Уровень воды в бассейне 4 м. (б) – Фотография квазистационарного положения дельфинов во время записи сигналов.

НАН Украины. Дельфины находятся в бассейне около 20 лет и имеют нормальный слух.

Конфигурация эксперимента была такая же, как в работе [27] (см. рис. 1). Эксперимент выполнялся без специальной дрессировки и без пищевого подкрепления дельфинов. Акустические сигналы дельфины свободно продуцировали по своему желанию, по-видимому, не подозревая, что их записывают. Сигналы записаны двухканальной системой в те промежутки времени, когда дельфины держались у поверхности воды у мостков, почти без движения, т.е. квазистационарно (рис. 1) относительно гидрофонов и друг друга. Двухканальная запись фиксирует не только временную, но и пространственную информацию о сигналах, и в этом ее главное преимущество по сравнению с одноканальной. Расстояние между гидрофонами I и II канала было выбрано равным 3,5 м, чтобы получить необходимую для анализа межканальную разницу амплитуд и времени прихода каждого сигнала, а также чтобы расположить их в дальнем акустическом поле дельфина (приблизительно 1,5 м). В то же время гидрофоны были погружены на глубину 1 м для того, чтобы уменьшить вероятность экранирования сигналов в направлении дальних от каждого животного гидрофонов телом другого животного. Для регистрации сигналов животных, отраженных от границ бассейна, гидрофоны были расположены таким образом (рис. 1а), чтобы один из них – гидрофон (2) – находился близко у стенки бассейна, а другой – гидрофон (1) – посередине бассейна. Благодаря этой методике все записанные сигналы были сопоставлены как дельфинам, так и их отра-

жениям от границ бассейна. Вместе с тем была зафиксирована динамика изменения межканальных уровней сигнала, отображающая динамику изменения характеристики направленности излучения сигналов. Для этого была учтена разница моментов времени прихода и разница амплитуд данного сигнала на гидрофонах I и II канала, а также известные расстояния между дельфинами, гидрофонами и границами бассейна.

Гидрофоны (1 и 2) – 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  $\pm 3$  дБ до частот около 160 кГц и  $\pm 10$  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 – 81 дБ, частота дискретизации каждого канала АЦП – 1 МГц. Оцифрованные сигналы дельфинов с АЦП непрерывно записывали на жесткий диск ноутбука. Запись и обработку сигналов осуществляли с помощью пакетов программ PowerGraph 3.3.8 и Adobe Audition 3.0. Спектры и сонограммы сигналов были рассчитаны с использованием быстрого преобразования Фурье на 1024 точки с весовой функцией Хэмминга. Форма зарегистрированных акустических импульсов сложная, поэтому при измерении их длительности выбран уровень  $-20$  дБ. Для достоверности выполнено большое количество за-

писей акустических сигналов дельфинов. Для анализа и обсуждения была выбрана одна из наиболее характерных записей (рис. 2). Во время записи сигналов других животных в бассейне не было.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 2 показана временная последовательность всех акустических сигналов, продуцированных дельфинами на протяжении 36,7 с записи. Сигналы, продуцированные дельфинами Яной и Яшей, обозначены соответствующим символом на I (II) канале. В связи с тем, что акустические сигналы имеют широкий динамический диапазон уровней звуковых давлений (УЗД), масштаб по оси ординат (рис. 2а) выбран таким, чтобы показать расположение всех сигналов. Свисты и когерентные импульсы имеют относительно низкие УЗД ( $-60$  –  $-36$  дБ относительно  $1000$  Па), поэтому показаны в более удобном масштабе по оси ординат на рис. 2б (сигналы с УЗД  $> -30$  дБ на этом рисунке ограничены).

Импульсные сигналы дельфины продуцировали пачками. Как правило, пачки импульсов одного типа разделены временными интервалами (сотни миллисекунд – единицы секунд), во много раз большими межимпульсными интервалами ( $t_{mi}$ ) в пачках ( $0,8$ – $300$  мс). Горизонтальная линия в обозначении пачек (рис. 2) указывает их длительность. Зарегистрированные акустические сигналы дельфинов разделены на пять различных типов в соответствии с их характеристиками.

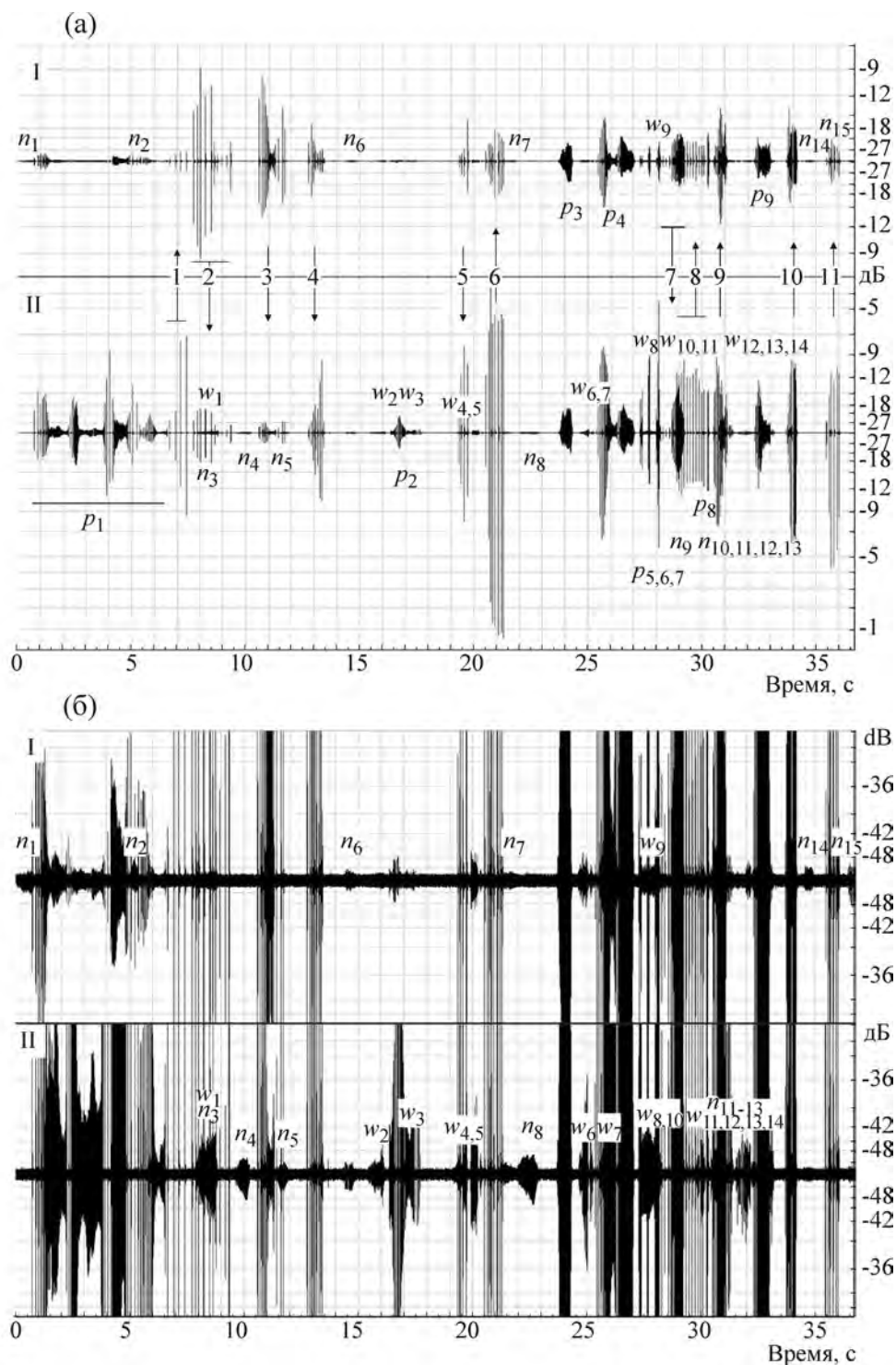
Пачки некогерентных импульсов (рис. 2, 3, 7, табл. 1) обозначены условным знаком «стрелка,  $n$ » (где  $n$  – порядковый номер сигнала) в месте локализации сигнала соответственно. Стрелки направлены от продуцента импульсов. Форма этих импульсов сложная (рис. 3) и изменялась от импульса к импульсу в каждой пачке. В связи с этим спектр каждого импульса состоит из множества ( $20$ – $30$ ) экстремумов, размещение и уровень которых изменяются от импульса к импульсу, поэтому они были названы автором некогерентными импульсами [27]. Энергия составляющих спектров некогерентных импульсов быстро падает на частотах ниже  $10$  кГц и выше  $140$  кГц (рис. 3). Амплитуда звукового давления некогерентных импульсов достигала  $15$ – $1000$  Па. Пачки некогерентных импульсов содержали от  $4$  до  $24$  импульсов с межимпульсными интервалами от  $260$  до  $18$  мс. Межимпульсные интервалы на протяжении пачки импульсов, как правило, плавно изменялись. Относительные изменения межимпульсных ин-

тервалов в пачке достигали  $9,72$  (табл. 1). Длительность некогерентных импульсов изменялась от  $0,14$  до  $0,6$  мс.

Пачки универсальных импульсов (рис. 2, 4, 5, табл. 2) описаны впервые, обозначены на рисунках условным знаком  $p_n$  (где  $n$  – порядковый номер сигнала) в месте локализации сигнала соответственно. Форма этих импульсов сложная. Межимпульсные интервалы, амплитуда, форма и спектр универсальных импульсов могли плавно (от импульса к импульсу) изменяться в пределах пачки. УЗД этих импульсов достигали  $3$ – $590$  Па, а сонограмма охватывала частоты  $3$ – $200$  кГц. Спектр универсальных импульсов имеет много экстремумов и охватывает частоты от  $14$ – $47$  до  $56$ – $126$  кГц, по уровню  $-6$  дБ. С уменьшением амплитуды импульсов в пачке уровень высокочастотных составляющих спектра понижается (табл. 2). Последовательность импульсов в начале пачки, как правило, имела большие межимпульсные интервалы, которые могли плавно изменяться (рис. 2, 4). В то же время встречались пачки импульсов одинаковой формы с постоянными межимпульсными интервалами ( $p_8$ , рис. 5), в этом случае они взаимно когерентны. Длительность универсальных импульсов изменялась в диапазоне  $0,08$ – $0,37$  мс, а длительность их пачек от  $5920$  до  $43$  мс.

Величина межимпульсных интервалов изменялась от  $165$  до  $1,08$  мс. Относительное изменение межимпульсных интервалов в пачке было от  $40,75$  до  $-1,14$  (знак минус означает возрастание межимпульсных интервалов на протяжении пачки) и не зависело от длительности пачки. Пачки универсальных импульсов насчитывали от  $6$  до  $108$  импульсов и даже  $375$  у  $p_1$  (табл. 2). Пачка  $p_1$  условно обозначена состоящей из четырех подпачек (1–1) – (1–4) в соответствии с изменением амплитуды импульсов – от максимальной до минимальной. Характеристики каждой последующей пачки универсальных импульсов существенно отличались от предыдущей.

Коэффициент заполнения пачки импульсов, показывающий отношение длительности импульса ( $t_i$ ) к межимпульсному интервалу ( $t_{mi}$ ), при высоких частотах следования импульсов достигал  $13\%$  (табл. 2). Как мы увидим дальше, форма универсальных импульсов может плавно изменяться на протяжении всего пакета импульсов в широких пределах. Кроме того, дельфины изменяют межимпульсные интервалы в пакетах универсальных импульсов и положение максимума характеристики направленности их излучения, поэтому такие импульсы мы назвали универсальными.



**Рис. 2.** Временная последовательность акустических сигналов дельфинов в разных масштабах (а) и (б) по оси ординат. Цифры со стрелками – последовательность и направление обмена пачками некогерентных импульсов.  $w_n$ ,  $p_n$  и  $n_n$  – локализация  $n$ -го «свиста»,  $n$ -й пачки универсальных импульсов и  $n$ -й пачки когерентных импульсов соответственно. Ось абсцисс – время, с. Ось ординат – УЗД в дБ относительно 1000 Па. I и II – первый и второй каналы соответственно.

Пачки когерентных импульсов (рис. 2, б, табл. 3) обозначены условным знаком  $n_n$  (где  $n$  – порядковый номер пачки импульсов) в

месте локализации пачки соответственно. Форма этих импульсов сложная. Спектр когерентных импульсов занимает область частот от 2,9–

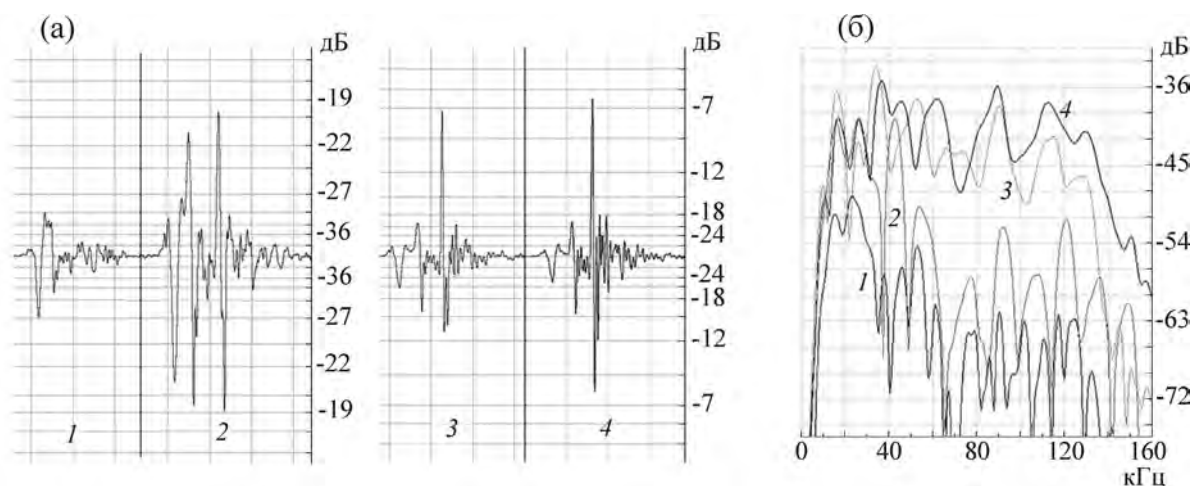
**Таблица 1.** Основные характеристики некогерентных импульсов

Номер пачки	Число импульсов в пачке	Средняя ширина спектра (кГц, -6 дБ)	Средняя длительность импульса, мс	Межимпульсные интервалы, мс	Относительное изменение межимпульсных интервалов	Длительность пачки, мс
1	4	13–115	0,23	254–219	1,16	743
2	10	10–118	0,25	260–125	2,08	1640
3	18	21–125	0,19	123– 33	3,73	1110
4	8	29–127	0,26	109–80	1,36	660
5	4	19–125	0,27	170–98	1,73	390
6	8	21–121	0,14	175–84	2,08	780
7	23	26–103	0,6	175–18	9,72	1080
8	12	22–111	0,15	99–109	1,10	1220
9	24	12–127	0,3	50–29	1,72	970
10	12	19–140	0,2	58–26	2,23	510
11	6	16–122	0,25	130–83	1,57	560

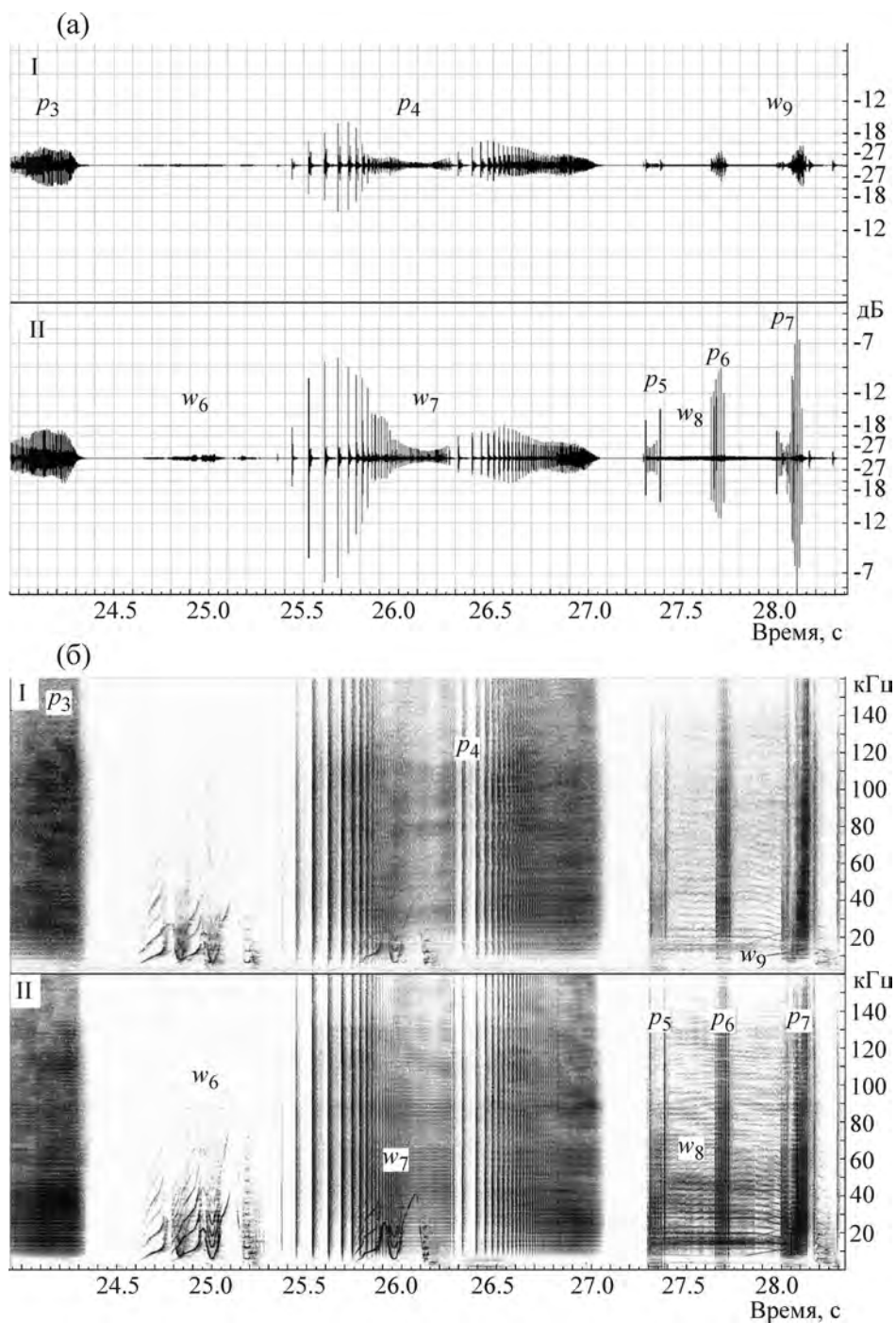
Примечание. В колонке «межимпульсные интервалы» указаны максимальное и минимальное значения интервалов в пачке.

15 до 3,9–85кГц (по уровню -6 дБ) и может иметь много максимумов и минимумов. Встречаются пачки относительно узкополосных и более широкополосных импульсов, но, как правило, максимум энергии приходится на относительно низкие частоты (10–30 кГц, рис. 6, табл. 3). От пачки к пачке форма и спектр этих импульсов существенно различаются. Однако в границах пачки форма импульсов взаимно когерентна и спектр неизменный, поэтому такие импульсы были названы когерентными [27]. Длительность этих импульсов составляет 0,1–1 мс. К сожалению, УЗД этих импульсов в редких случаях превышает уровень шума на 20 дБ, поэтому длительность импульсов измерена на уровне от -12 до -20 дБ. Межимпульсные

интервалы в пачках когерентных импульсов, как правило, плавно уменьшались от начала к концу пачки в диапазоне 39,0–0,8 мс и реже наоборот, но могли и не изменяться (табл. 3). Относительное изменение межимпульсных интервалов было от 6,6 до - 2,6 (знак минус означает возрастание межимпульсных интервалов на протяжении пачки) и не зависело от длительности пачки. Длительность пачек когерентных импульсов изменялась от 37 до 910 мс, число импульсов в пачке – от 8 до 423. Коэффициент заполнения пачки импульсов в некоторых случаях достигал 20–40% (рис. 6, табл. 3). Характеристики каждой последующей пачки когерентных импульсов существенно отличались от предыдущей.



**Рис. 3.** Форма (1, 2, 3, 4) (а) и спектр (б) четырех некогерентных импульсов пакета 1 (рис. 2а, II канал), продуцированных дельфином Яшей с 6,66 по 7,40 с соответственно. Ось абсцисс – время, 0,1 мс/дел и частота в кГц, соответственно. Ось ординат – УЗД в дБ относительно 1000 Па и уровни спектральной плотности в дБ соответственно.



**Рис. 4.** Форма (а) и сонограмма (б) пачек универсальных импульсов ( $p_3$ – $p_7$ ) и «свистов»  $w_7$ – $w_9$ . Ось абсцисс – время (по рис. 2), с. Ось ординат – УЗД в дБ относительно 1000 Па и частота в кГц соответственно. I и II – первый и второй каналы соответственно.

«Свисты» (рис. 2, 4, 7, табл. 4) обозначены условным знаком  $w_n$  (где  $n$  – порядковый номер «свиста») в месте его локализации соответственно. УЗД «свистов» достигал 2–16 Па. Диапазон их длительностей – от 30 до 1020 мс. Фундаментальная частота «свистов» изменялась в диапазоне от 3,8 до 42 кГц, а число гармоник

от 2 до 16 (рис. 4, 7, табл. 4). Число гармоник «свиста», как правило, было больше на гидрофоне, ближнем к свистящему дельфину, чем на дальнем гидрофоне. Гармоники занимали область частот до 100 кГц. Зарегистрированы два шумоподобных «свиста»  $w_8$ ,  $w_{10}$  с УЗД до 10 Па и числом гармоник более 50 и 28 соответ-

**Таблица 2.** Основные характеристики универсальных импульсов

Но- мер пачки	Число им- пульсов в пачке	Средняя ширина спектра импульса (кГц, -6 дБ)	Средняя дли- тельность им- пульса, мс/КЗ%	Диапазон межимпульсных интервалов, мс	Относительное изменение межимпульсных интервалов	Длитель- ность пачки, мс
1-1	86	23-124; 14-54	0,15/ 2%	165-7	23,57	1585
1-2	96	30-125; 11-111	0,08	80-8,8	9,09	1535
1-3	92	33-125; 8-34	0,09	148-4,3	34,42	1010
1-4	101	28-121; 10-46	0,19	163-4	40,75	1642
2	44	47-126; 23-71	0,11	83-19	4,37	1360
3	71	23-113; 23-106	0,22	27-4,7	5,74	590
4	108	26-120; 16-50	0,14	86-5,5	15,63	1710
5	8	21-59; 24-40	0,16	18-11	1,64	90
6	6 пар	1(14-41) 2(21-90)*	1(0,21) 2(0,2)*	14-16 0,72-0,77**	-1,14	46
7	18	19-56; 9-20	0,14	13,1-7	1,87	135
8	39	27-90	0,14/ 13%	1,08	1	43
9	46	33-123; 24-103	0,37/ 5%	64-6,7	9,55	680

Примечание. В столбце «ширина спектра» первое значение для импульсов максимальных амплитуд, второе – минимальных. \* 1<sup>й</sup> и 2<sup>й</sup> импульсы в паре. \*\* Между импульсами в паре. КЗ – коэффициент заполнения пачки.

ственно (рис. 2, 4, табл. 4). Составляющие спектра этих «свистов» в области слуха дельфина плавно спадают с ростом частоты до уровня -15 дБ (на 135 кГц).

### ОБСУЖДЕНИЕ

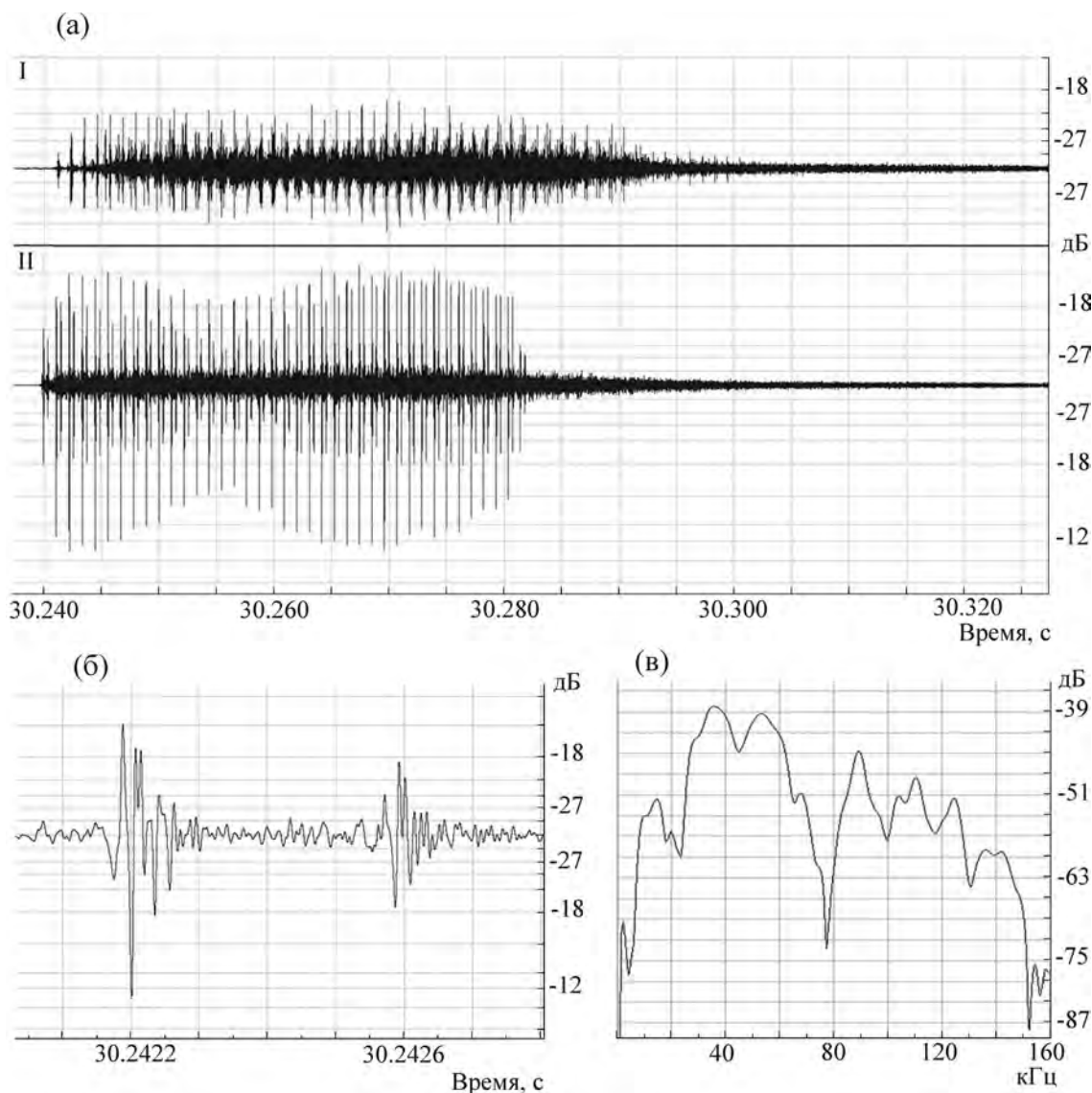
Всего за 36,7 с (рис. 2, табл. 1-4) дельфины продуцировали: 11 пачек некогерентных импульсов, содержащих 129 импульсов; 9 пачек универсальных импульсов, содержащих 721 импульс; 15 пачек когерентных импульсов, содержащих 1545 импульсов и 14 свистовых сигналов, что согласуется с данными работы [27]. Следовательно, дельфины используют широкий арсенал звуков даже днем. Можно полагать, что некогерентные импульсы дельфины используют для общения друг с другом, а остальные – для ориентации в бассейне, чтобы ощущать свое перемещение относительно другого дельфина, мостков, стенок и дна бассейна и чтобы проводить мониторинг окружающего пространства бассейна на дистанциях, превышающих прозрачность воды, т.е. приблизительно > 5 м.

Сигналы дельфинов охватывают частоты до 250 кГц, но, учитывая, что их слуховые пороги начинают существенно возрастать на частотах выше 135 кГц, спектры и сонограммы сигналов (рис. 3-7), показаны только до 160 кГц.

Акустические сигналы разных типов каждый дельфин мог продуцировать одновременно (рис. 2, 4, 7). Так, например, дельфин Яша одновременно продуцировал пачку когерент-

ных импульсов  $n_3$  и «свист»  $w_1$ ; «свист»  $w_3$  и пачку универсальных импульсов  $p_2$ ; шумоподобный «свист»  $w_8$  и пачку универсальных импульсов  $p_5-p_7$ ; пачку некогерентных импульсов 8, «свист»  $w_{11}$  и пачку когерентных импульсов  $n_9$ ; пачку некогерентных импульсов 9 и пачку когерентных импульсов  $n_{11}$  и др. Следовательно, некогерентные импульсы, «свисты» и когерентные импульсы продуцируют видимо, три разных органа дельфина, что согласуется с данными работы [27]. Учитывая также существенное различие характеристик универсальных и когерентных импульсов (рис. 2, 4-6, табл. 2, 3, 5), а также подобие УЗД и ширины спектров этих импульсов, можно полагать, что когерентные и универсальные импульсы продуцируют разные (пока еще неизвестные) органы дельфина, но универсальные и некогерентные импульсы продуцирует один и тот же (пока еще неизвестный) орган дельфина.

Отметим, что «щелчки» наиболее изученного сонара дельфина [8] животные в этом эксперименте не продуцировали (рис. 2), как и в работе [27], что можно попытаться объяснить надводным положением лобно-жирового выступа (рис. 1). Хотя эти же дельфины излучали «щелчки» (длительностью 12 мкс по уровню -20 дБ) при решении других эхолокационных задач, когда погружались под воду (табл. 5). Следует отметить, что «щелчки» в свете теории сигналов являются когерентными сверхширокополосными сверхкороткими сигналами. Следовательно, у дельфина видимо есть, по мень-



**Рис. 5.** (а) – Пакет универсальных импульсов  $p_8$ . (б) – Форма одиночного импульса и задержанное отражение его от стенки  $b$  (рис. 1) и спектр (в) одиночного импульса. Ось абсцисс – время (по рис. 2) в с и частота в кГц соответственно. Ось ординат – УЗД в дБ относительно 1000 Па и уровни спектральной плотности в дБ соответственно. I и II – первый и второй каналы соответственно.

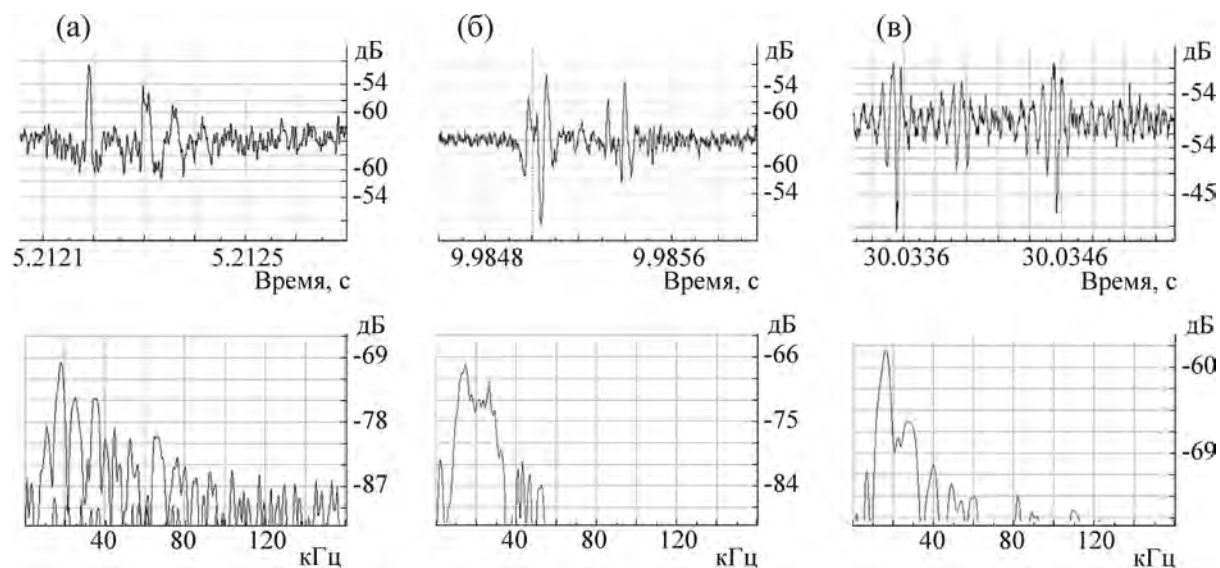
шей мере, четыре органа, которыми он независимо продуцирует пять типов акустических сигналов («щелчки», пачки некогерентных и универсальных импульсов, пачки когерентных импульсов, «свисты»).

Известно, что звуковое давление в сферической волне убывает пропорционально расстоянию. Учитывая расстояния до ближнего и дальнего гидрофонов от каждого дельфина (1 и 3 м соответственно), очевидно, что при излучении дельфином ненаправленного сигнала регистрируемый УЗД на дальнем гидрофоне будет на 8–10 дБ меньше, чем на ближнем. В то же время двухканальная регистрация (рис. 1, 2) обнаружила межканальные различия УЗД

сигналов дельфина, отличные от 8–10 дБ (рис. 2, 4, 5, 7, табл. 4), что указывает на направленность и пространственное изменение положения максимума характеристики направленности излучения сигналов стационарного дельфина. Однако для точных количественных измерений сканирования характеристик направленности излучения сигналов дельфина нужны специальные исследования.

Следует отметить значительное, до двух порядков, изменение межимпульсных интервалов,  $t_{mi}$ , в пачках импульсов (табл. 1–3). С точки зрения эхолокации однозначное измерение дальности цели возможно при низких частотах следования зондирующих импульсов, когда  $t_{mi} >$





**Рис. 6.** Форма (вверху) и спектр (внизу) когерентных импульсов соответственно. (а) – Одиночный импульс, составляющий пачку  $n_2$ , (б) – одиночный импульс составляющий пачку  $n_4$  и его задержанное отражение от стенки  $b$  (рис. 1), (в) – суперпозиция свиста  $w_{11}$  с парой когерентных импульсов пачки  $n_9$  (межимпульсный интервал 1 мс, 30%) и их задержанных отражений от стенки  $b$  (рис. 1). Ось абсцисс – время в с (по рис. 2) и частота в кГц соответственно. Ось ординат – УЗД в дБ относительно 1000 Па и уровни спектральной плотности в дБ соответственно.

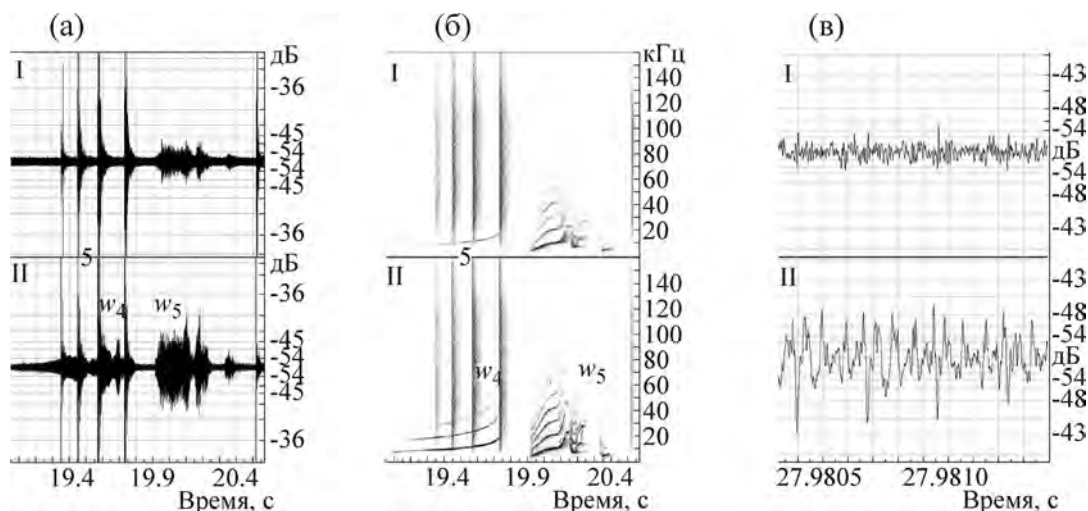
$t_{2w}$ , где  $t_{2w}$  – время двойного пути звука до цели. Однако в этом случае возрастает неопределенность измерения доплеровского сдвига частот эхосигнала. Следовательно, при низких

частотах следования импульсов дельфин, по-видимому, производит измерение дальности цели и может для этого использовать как «щелчки», когерентные и универсальные импульсы,

**Таблица 3.** Основные характеристики когерентных импульсов

Номер пачки	Число импульсов в пачке	Ширина спектра импульса (кГц, -6 дБ)	Средняя длительность импульса, мс/КЗ(%)	Диапазон меж-импульсных интервалов, мс	Относительное изменение меж-импульсных интервалов	Длительность пачки, мс
1	51	13–24	0,2	12,5–5,9	2,12	462
2	112	16–37	0,3	4–3	1,33	393
3	98	8–18*		12,7–5,9	2,15	840
4	86	11–26	0,18	13–5	2,60	600
5	138	10–20	0,35	3,8–3,3	1,15	820
6	16	14–38	0,35	33–28	1,18	400
7	230	14–19	0,38	3,3–2,9	1,14	690
8	125	10–28	0,23	27–4,1	6,58	910
9	32	12–21	0,3/30%	1–2	-2,00	34
10	75	11–55	0,17/20%	0,97–0,8	1,21	65
11	423	8–24	0,1/11%	0,85	1,00	360
12	15	9–35	0,38	22–28	-1,27	880
13	10	2,9–3,9	1/40%	2,5–6,5	-2,60	37
14	126	15–41	0,2/5%	4,6–3,3	1,39	470
15	8	11–85	0,28	34–39	-1,15	280

Примечание. Первая цифра в столбце «диапазон межимпульсных интервалов» обозначает величину межимпульсного интервала в начале пачки – вторая в конце. \* Пакет излучался одновременно со свистом  $w_1$ . КЗ – коэффициент заполнения пачки.



**Рис. 7.** Межканальная разница УЗД (а) и гармоник (б) «свистов»  $w_4$  и  $w_5$ . Фрагмент формы шумоподобного «свиста»  $w_8$  (с). Ось абсцисс – время в с (по рис. 2). Ось ординат – УЗД в дБ относительно 1000 Па и частота в кГц соответственно. I и II – первый и второй каналы соответственно.

так и некогерентные импульсы. Известно также, что дельфин использовал «щелчки» в качестве зондирующих сигналов для эхолокационного различия, распознавания и классификации подводных объектов [1–10].

Вместе с тем, использование дельфином когерентных зондирующих импульсов («щелчки», когерентные и универсальные импульсы) предполагает когерентную обработку эхосигналов [27]: когерентное накопление полезного эха, когерентную компенсацию мешающих отражений и обработку эхосигналов методом селектора движущихся целей, используемых в технике эхолокации. Селектор движущихся целей повышает помехозащищенность эхолокационной системы при выделении полезного движущегося эха на фоне стационарной реверберационной помехи за счет взаимного подавления эхосигналов от стационарных мешающих объектов и накопления эха от полезных движущихся объектов.

При высоких частотах следования импульсов в пачках, когда  $t_{mi} < t_{2w}$ , возможно однозначное измерение доплеровского сдвига частот эхосигнала. В этом случае зондирующий сигнал дельфина предполагает обработку эхосигналов способом импульсного доплеровского сонара, широко используемого в эхолокационной технике. В отличие от непрерывного или частично-модулированного доплеровского сонара, спектр пачки когерентного импульса линейчатый, с расстоянием между спектральными линиями, равным частоте следования импульсов. При отражении от движущейся цели линии спектра пачки импульсов смещаются по частоте в соответствии с выражением  $f_d = -2V_r/\lambda$ , где:

$\lambda = c/f$  длина волны спектральной линии,  $c$  – скорость звука в воде,  $f$  – частота спектральной линии,  $V_r$  – относительная радиальная скорость между сонаром и целью. Поэтому можно полагать, что доплеровский сдвиг частот эха ( $f_d$ ) дельфин будет измерять даже с большей точностью, анализируя линейчатые спектры прямой и отраженной пачек когерентного импульса, чем непрерывные спектры свистов (так как непрерывные спектры имеют большую неопределенность по оси частот, чем линейчатые). При этом различный контур изменения межимпульсных интервалов внутри пачек когерентных импульсов, дельфин, по-видимому, использует как оперативную метку каждой «своей» пачки этих импульсов, чтобы при анализе отличать эхосигналы «своих» пачек когерентных импульсов от пачек сородичей.

При высоких частотах следования когерентных импульсов коэффициент заполнения пачки импульсов достигал 20–40% (рис. 6, табл. 2, 3). В эхолокационной технике последовательность импульсов с коэффициентом заполнения больше 10% называется квазинепрерывной. Принцип квазинепрерывного излучения удачно сочетает преимущества импульсного и непрерывного режима работы эхолокатора. С увеличением числа импульсов повышается энергия зондирующего сигнала и, как следствие, эхосигнала. Так, например, после окончания пакета  $p_8$  (рис. 5, II канал) продуцированного дельфином Яшей, ясно видно, что УЗД эхосигналов (рис. 5, I канал) лишь немного ниже УЗД прямого сигнала. Судя по задержкам (приблизительно от 30,283 до 30,293 с), эти эхосигналы могут быть от передней, рис. 1 (7), левой (6), правой

**Таблица 4.** Основные характеристики «свистов»

Номер свиста	Длительность свиста, мс	Диапазон частот основного тона, кГц	Число гармоник	Межканальная разница УЗД, дБ
1	930	4–22,8	5	12
2	640	7,5–21,9	4	20
3	390	7,5–11,1	4	18
4	630	7,4–18,2	4	16
5	490	4,6–27,9	10	7
6	610	4,5–40,7	16	12
7	430	4,4–41	5	15
8	1020	3,9 (3,9–135)	> 50 шп	12
9	370	6,9–13,1	2	
10	165	11 (11–135)	> 28 шп	8
11	395	5,5–36	8	3–6
12	30	5,4–5,6	5	10
13	370	3,8–35,4	15	7
14	400	4,5–42		18

Примечание. шп – шумоподобный «свист», в скобках его спектр частот с гармониками по уровню –15 дБ.

боковой стенок и дна бассейна (8) и далее (от 30,293 до 30,303 с) от дальней стенки, противоположной стенке (7).

Для расчета базы ( $B$ ) записанных сигналов взяты измеренные значения средней длительности ( $\Delta t$ ) и средней ширины спектра ( $\Delta f$ ) соответствующих сигналов. Рассчитанная база ( $B = \Delta t \cdot \Delta f$ ) всех типов сигналов дельфина различна (табл. 5), и существенно больше базы простых сигналов (например, радиоимпульс с тональным заполнением,  $B = 1$ ). Это указывает на сложность и функциональную специализацию каждого из рассмотренных типов сигналов дельфина в роли зондирующих сигналов различных типов сонаров. Более того, некогерентные импульсы наряду с выполнением эхолокационной функции, по-видимому, являются сигналами разговорного языка дельфина [27], поэтому имеют максимальное значение базы среди импульсных сигналов дельфина, но в данной работе будем их рассматривать только с точки зрения эхолокации.

Пространственное затухание звука в воде быстро возрастает с ростом его частоты. Коэффициент пространственного затухания ( $\beta$ ) на низких частотах (до 20 кГц) еще незначителен, около 1 дБ/км, но на частотах около 100 кГц  $\beta > 33$  дБ/км, а на частоте 1 МГц –  $\beta > 330$  дБ/км. Поэтому ширина спектра сигналов дельфина (до 150 кГц) исключает возможность использования более высокочастотной несущей для увеличения дальности сонаров. Вследствие этого Природа, по-видимому, была вынуждена

создать дельфинам разные сложные специализированные зондирующие сигналы («щелчки», пачки когерентных, некогерентных и универсальных импульсов, «свисты») и соответствующие им механизмы обработки эхосигналов в слухе дельфина, оптимизированные по разным эхолокационным задачам.

Некогерентные и универсальные импульсы дельфин продуцирует одним (пока еще неизвестным) органом, они охватывают одинаковую полосу частот и имеют близкие УЗД, и, на первый взгляд, хотелось бы их не разделять на два разных типа. Однако рассмотренные выше различия их характеристик, функций и динамики, указывает на различную функциональную специализацию этих сигналов, что требует специального выделения каждого типа импульсов.

Интересно, что УЗД и форма универсальных импульсов на протяжении пачки  $p_1$  (рис. 2, П канал) принимали почти одинаковую форму, когда их УЗД были максимальны (на временных интервалах 0,75–1,3; 2,35–2,65; 3,85–4,2; 4,9–5,25 с). Анализ спектров последовательностей этих импульсов в пачках показывает существенное уменьшение уровней высокочастотных составляющих и соответствующее понижение по частоте их энергетического максимума с уменьшением амплитуд импульсов (табл. 2, рис. 4, пачки  $p_3$ – $p_7$ ). Более того, как для некогерентных импульсов в пачках 1–5, 9 (рис. 2), так и для универсальных импульсов в пачках  $p_1$ – $p_9$  (рис. 2) наблюдается плавное, от импульса к импульсу, изменение амплитуды. При этом закон из-

Таблица 5. Характеристики зондирующих сигналов дельфина

Тип сигнала	Средняя длительность, $\Delta t$ , мс	Средняя ширина спектра, $\Delta f$ , кГц	База сигнала $B = \Delta t \cdot \Delta f$
«Щелчки»	$0,012 \pm 0,002$	$90 \pm 5,5$	1,1
Когерентные импульсы	$0,315 \pm 0,215$	$15,7 \pm 10,9$	4,96
Универсальные импульсы	$0,166 \pm 0,08$	$79,3 \pm 22,9$	13,2
Некогерентные импульсы	$0,258 \pm 0,123$	$104 \pm 9,2$	26,9
«Свист»	$490 \pm 264$	$20,9 \pm 13,8$ (100)	10251 (49000)

Примечание. В скобках – с учетом спектра гармоник «свиста».

менения амплитуд на I и II каналах у некогерентных импульсов может быть подобный (пачки 2, 3 и 9), как и у универсальных импульсов в пачках ( $p_2, p_4, p_5-p_8$ ), но может быть и различный (пачки 1, 4, 5 некогерентных импульсов; пачки  $p_1, p_3, p_9$  универсальных импульсов). Амплитуда импульсов на ближнем к дельфину гидрофоне может быть большей по сравнению с дальним гидрофоном (пачки 1–3, 6, 8–11 некогерентных импульсов и пачки  $p_1, p_2, p_5-p_8$  универсальных импульсов), но может быть и меньшей (пачки 4, 5, 7 некогерентных импульсов) и (пачки  $p_3, p_4, p_9$  универсальных импульсов). Все эти факты указывают на модификацию и сканирование характеристики направленности излучения некогерентных и универсальных импульсов в пространстве при неизменном положении дельфина. Тогда положение максимума характеристики направленности излучения импульсов пачки  $p_1$  в течение интервалов времени, когда они имеют максимальную амплитуду и почти одинаковую форму (рис. 2, II канал), по-видимому, наиболее близко к направлению на приемный гидрофон 2 (рис. 1).

Интересно, что дельфин может существенно изменять форму этих импульсов (рис. 2, 3, 4) и даже продуцировать пачки универсальных импульсов с постоянной формой и межимпульсным интервалом (рис. 5), т.е. пачки когерентных импульсов. Но в этом случае они более широкополосные и имеют большие УЗД, чем когерентные импульсы, продуцированные другим (пока еще неизвестным) органом дельфина (рис. 6). Характеристики некогерентных и универсальных импульсов предполагают обработку их эхосигналов различными методами (селектора движущихся целей, импульсного доплеровского сонара, некогерентного сонара и, возможно, пока еще неизвестными нам методами). Все это указывает на то, что сонар, использующий эти импульсы, может выполнять широкий спектр задач, поэтому назван нами универсальным.

Зондирующие сигналы, подобные некогерентным и универсальным импульсам, используются в технике эхолокации – это конкатенационные сигналы с прерывистой модуляцией. Они состоят из дискретных подимпульсов, таких, что

$$\begin{aligned}
 f(t) &= f_1(t) \quad 0 < t < T_1, \\
 f(t) &= f_2(t - T_1) \quad T_1 < t < T_2, \\
 &\dots \\
 f(t) &= f_n(t - T_{n-1}) \quad T_{n-1} < t < T_n.
 \end{aligned}$$

Индивидуальные интервалы подимпульсов  $T_{i+1} - T_i$  могут быть одинаковы или неодинаковы, а подимпульсные функции могут быть частично обнулены, тогда сигнал становится цепочкой отдельных импульсов, разделенных разными межимпульсными интервалами. Подимпульсы могут иметь различную модуляционную функцию. Эти сигналы могут обеспечивать функцию неопределенности с одним острым лепестком.

Изучение характеристик и возможностей сонара дельфина, использующего некогерентные и универсальные импульсы, вероятно, представляет особый интерес и требует специального рассмотрения в дальнейшем. Учитывая также, что некогерентные импульсы представляют собой разговорный язык дельфинов и используются для эхолокации [27], полученные результаты также подтверждают бимодальность некогерентных и универсальных импульсов.

Рассмотренные характеристики когерентных импульсов (рис. 2, 6, табл. 3, 5) согласуются с результатами работы [27] и сигналами, зарегистрированными в естественных условиях у свободно плавающих гавайских (длиннорылый продельфин *Stenella longirostris*) и атлантических (продельфин стенелла *Stenella frontalis*) дельфинов [28,29]. Следовательно, черноморские афалины продуцируют и используют пачки когерентных импульсов (рис. 2) так же, как гавайские и атлантические дельфины, предположительно как сигналы импульсного доплеровского сонара [27]. Вместе с тем в пачках  $n_1-n_5, n_7-n_8$

наблюдается плавное (от импульса к импульсу) изменение амплитуды и межимпульсных интервалов когерентных импульсов (рис. 2). Однако не всегда можно сравнить изменения амплитуд импульсов на ближнем и дальнем гидрофонах, так как сигналы на дальнем гидрофоне маскируются шумами ( $n_1$ – $n_5$ ,  $n_8$ ,  $n_{12}$ ,  $n_{14}$ ,  $n_{15}$ ). В то же время амплитуда импульсов в пачке ( $n_8$ ) на ближнем к дельфину гидрофоне (рис. 2) была бóльшей по сравнению с дальним гидрофоном почти на 14 дБ (т.е. это на 5 дБ больше, чем должно было бы быть при отсутствии направленности сигналов). Там, где амплитуда импульсов существенно превышала уровень шумов, можно было увидеть закон изменения амплитуд на I и II каналах, который мог быть подобный ( $n_6$ ,  $n_{11}$ ), различный ( $n_7$ ), и в пачках ( $n_6$ ,  $n_7$ ) амплитуда импульсов на дальнем гидрофоне была даже бóльшей, чем на ближнем, почти на 4 дБ (рис. 2). Кроме того, анализ спектров последовательностей импульсов показывает уменьшение высокочастотных составляющих с уменьшением амплитуд импульсов (обычно в начале и конце пачки). Следовательно, когерентные импульсы, похоже, не имеют высокой направленности излучения. Хотя в некоторых случаях и наблюдается некоторая незначительная направленность, она существенно ниже, чем у некогерентных и универсальных импульсов и «свистов». Следовательно, эхосигналы от когерентных импульсов будут приходиться из широкой области пространства вокруг дельфина. Дельфины продуцируют когерентные импульсы на расстояниях до 3–14 м [29], и, видимо, поэтому такие импульсы имеют самые низкие УЗД (1–10 Па) из зарегистрированных сигналов (рис. 2, б). Вероятно, дельфины используют когерентные импульсы, когда находятся вблизи препятствий (подводные скалы, дно, поверхность воды) или друг относительно друга, когда им важно контролировать относительное перемещение и скорость без участия зрения, чтобы избегать столкновений. Более того, при высоких частотах следования когерентных импульсов в пачке (0,3–1,25 кГц) и расстояниях до цели соответственно меньше (2,5–0,6 м), когда  $t_{mi} > t_{2w}$ , дельфин, наряду с доплеровским сдвигом, по-видимому, однозначно измеряет и дальность до цели. На это указывает достаточно высокий уровень эхосигналов от боковой стенки бассейна, рис. бб,в, и высокая разрешающая способность слуха дельфина по времени – около 0,02 мс [30–33], что позволяет ему обрабатывать короткие эхосигналы, приходящие с таких малых расстояний.

Формы контуров фундаментальной частоты записанных «свистов» и число гармоник (рис.

2, 4, 7, табл. 4) в общем согласуются с известными работами [16–26]. Однако дельфин Яша продуцировал свистовые сигналы  $w_6$ ,  $w_7$ ,  $w_{11}$ ,  $w_{13}$  и  $w_{14}$  с фундаментальной частотой от 3,8–5,5 до 35–42 кГц, что даже несколько выше (до 20–35 кГц), чем в цитируемых работах. Кроме того, впервые зарегистрированы два широкополосных шумоподобных «свиста» –  $w_8$ ,  $w_{10}$  с УЗД до 10 Па (рис. 4, табл. 4) и числом гармоник более 50 и 28 соответственно. Эти сигналы имеют достаточный уровень энергии в области звуковых частот, поэтому при воспроизведении человек хорошо слышит их как шумовые импульсы. Полученные результаты указывают на то, что их продуцирует тот же орган, что и обычные «свисты», но сигналы имеют характерную форму и спектр (рис. 4, 7). «Свисты» с такими высокими фундаментальными частотами, как и шумоподобные, ранее не отмечались у дельфинов, что, возможно, определялось ограниченными возможностями регистрирующего оборудования у авторов. Интересно, что эти «свисты» ( $w_6$ ,  $w_7$ ,  $w_{11}$ ,  $w_{13}$  и  $w_{14}$ ) имеют сложную форму контура, а места резких изменений контура сопровождаются заметными на сонограмме широкополосными шумоподобными всплесками (рис. 4).

Следует отметить, что дельфин Яша продуцировал практически все «свисты» (рис. 2), тогда как дельфин Яна – только один  $w_9$ , с 27,76 по 28,13 с. В это же время дельфин Яша продуцировал шумоподобный «свист»  $w_8$  и пакет универсальных импульсов  $p_7$  (рис. 4). Интересно, что несколько ранее [27], в таких же условиях, «свисты» имели другую форму контуров, и их максимальная фундаментальная частота не превышала 28 кГц. Такой характер продуцирования «свистов» указывает на использование их дельфинами скорее для ориентации.

Сигналы, подобные «свистам» дельфина, используются в эхолокационной технике. В общем виде они описываются одной или несколькими функциями, каждая длительностью ( $T$ ). Когда это тоны, сигнал называется симултон. Функция неопределенности равномерно распределенных тонов многолепестковая. Симултон имеет сильную амплитудную модуляцию, возрастающую с ростом числа гармоник. Если число гармоник в данной полосе частот велико, форма сигнала становится шумоподобной, напоминающей ограниченный полосой частот шум, подобно «свистам»  $w_8$  и  $w_{10}$  (рис. 2, 4). «Свист» дельфина наряду с гармониками может иметь амплитудную, частотную и фазовую модуляции. Подобные сигналы используются в эхолокационной технике как зондирующие сигналы доплеров-

ского сонара. Дельфин, по-видимому, может их использовать также в качестве сигналов частотно-модулированного доплеровского сонара. В этом случае обработка эха дельфином, по-видимому, выполняется в доплеровских фильтрах слуха, настроенных на определение доплеровского сдвига частот эха не только основного тона, но и гармоник «свиста», что будет существенно повышать чувствительность сонара при измерении медленных радиальных скоростей [27]. В этом случае различная форма контура каждого «свиста» может быть оперативной меткой «своего» сигнала, чтобы при анализе отличать эхосигналы «своих» «свистов» от «свистов» сородичей.

В то же время широкополосность «свистов» (диапазон частот основного тона и гармоник достигает 100 кГц, и даже 135 кГц у шумоподобных) указывает на возможное использование их дельфином как зондирующих сигналов сонара со сжатием импульса [27]. В этом случае эхосигналы могут обрабатываться в согласованном фильтре слуха дельфина. Известно, что длительность реакции такого фильтра будет обратно пропорциональна ширине спектра «свиста» и не зависит от длительности и формы контура фундаментальной частоты «свиста». При этом коэффициент временного сжатия эхосигнала фильтром будет равен базе сигнала, которая при учете только девиации фундаментальной частоты «свиста» достигает 10251, а с учетом гармоник «свиста» – 49000 (табл. 5) и еще больше у шумоподобных «свистов», например, у  $w_8$  – около 108000. Это указывает на то, что «свисты» просто идеальны для использования их дельфинами как зондирующих сигналов в сонаре со сжатием импульса. В этом случае дельфин, используя широкополосные сигналы большой длительности («свисты»), получает высокое разрешение сонара по дальности на больших расстояниях до цели, при этом уменьшается требование к высокой пиковой мощности органа продуцирующего «свист», так как для повышения энергии сигнала дельфин может просто увеличивать его длительность. При этом различная форма контура каждого «свиста» также может играть роль оперативной метки «своего» сигнала.

Интересно, что максимальное значение УЗД «свиста»  $w_4$  (рис. 7) на канале II достигает –45 дБ относительно 1000 Па, тогда как на канале I около –61 дБ (разница 16 дБ), при этом на сонограмме канала I видна только его фундаментальная частота. Однако следующий через 180 мс «свист»  $w_5$  имеет межканальную разницу УЗД только около 7 дБ (т.е. как ненаправленный сигнал), при этом формы огибающих и

гармоники «свиста»  $w_5$  подобны и хорошо видны на обоих каналах сонограммы. Напомним, что дельфины во время регистрации сигналов были квазистационарны (рис. 1). Следовательно, зарегистрированные межканальные различия УЗД «свистов»  $w_2-w_4$ ,  $w_7$ ,  $w_{11}$  и  $w_{14}$  (табл. 4) свидетельствуют о пространственной направленности излучения свистовых сигналов и о способности дельфина быстро изменять направление максимума характеристик направленности излучения «свистов», не изменяя положения тела в пространстве. Сканирование характеристик направленности излучения «свистов» в этом случае свидетельствует скорее об их использовании дельфином для ориентации.

В то же время полученные результаты согласуются с тем, что «свист» может использоваться дельфинами в определенном поведенческом контексте [16,17] – идентифицировать каждую особь «свистами подписями» [20] – и использоваться для поддержания контакта между отдельными рассеянными особями [23] на расстоянии до 10,5 км [26]. Однако сканирование характеристик направленности излучения «свиста» в пространстве относительно дельфина существенно усложняет возможность определения направления движения свистящего дельфина [8,34]. Полученные результаты и цитируемые данные согласуются с представлением о том, что «свисты» бимодальны [27] и могут использоваться дельфином при обмене ограниченным количеством сообщений, как коммуникационные сигналы, и для ориентации, как зондирующие сигналы частотно-модулированного сонара со сжатием импульса и частотно-модулированного доплеровского сонара.

Каким же образом дельфин слышит и локализует такое количество акустических сигналов и эхосигналов? Максимум чувствительности «нового наружного уха» дельфина [35–37] охватывает назальные вентральные и латеральные направления. Такая широкая пространственная направленность слуха обеспечивает идеальные условия для обнаружения и разговорного языка, и эхосигналов рассмотренных сонаров дельфина, и любых акустических сигналов в широком пространстве вокруг дельфина. Более того, частичное назально-вентральное взаимное пересечение характеристик направленности левого и правого уха формирует сложную пространственно-частотную характеристику направленности слуха дельфина [35,37,38], что совместно с бинауральными признаками обеспечивает трехмерную локализацию и разговорного языка, и эхосигналов рассмотренных сонаров дельфина [27], и любых акустических сигналов.

Полученные результаты указывают на то, что есть все основания для более детального изучения сонаров дельфина, эволюция которых насчитывает десятки миллионов лет. Хотелось бы думать, что полученные результаты дадут несомненный выигрыш при использовании их не только в гидролокации, но и в радиолокации.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из полученных результатов следует.

1. Эхолокационная система дельфинов и, по-видимому, *Odontoceti*, более сложная, чем это предполагалось ранее, и имеет по меньшей мере четыре органа, продуцирующих разные типы зондирующих сигналов независимо: «свисты» (симултоны), пачки некогерентных, универсальных и когерентных импульсов, «щелчки» (когерентные сверхширокополосные сигналы).

2. Все акустические сигналы дельфина являются сложными специализированными зондирующими сигналами, по меньшей мере, шести его сонаров, приспособленных к решению различных эхолокационных задач. Вместе с тем некогерентные импульсы наряду с эхолокационной функцией, по-видимому, играют роль сигналов разговорного языка дельфина. Остальные сигналы дельфина в разной степени бимодальны и могут быть использованы им при обмене ограниченным количеством сообщений как коммуникационные.

3. Сонары дельфина, использующие «свисты» (симултоны), некогерентные и универсальные импульсы, модифицируют и сканируют характеристики направленности излучения их в пространстве.

4. В соответствии с рассмотренными в работе новыми типами зондирующих сигналов дельфина, предполагаются адекватные им, известные из техники эхолокации методы обработки эхосигналов дельфином: селектора движущихся целей, импульсного доплеровского сонара, частотно-модулированного сонара со сжатием импульса, частотно-моделированного доплеровского сонара, универсального сонара, некогерентного сонара и, возможно, других.

Автор выражает благодарность Н.Г. Бибинову (Акустический институт, Москва) за предоставление аналогоцифрового преобразователя USB-3000, а также персоналу лаборатории морских млекопитающих Карадагского природного заповедника и особенно тренерам С. Яхно и Н. Жуковой за неоценимую помощь при выполнении работы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. W. W. Evans and B. A. Powell, in *Animal Sonar Systems: Biology and Bionics*, Ed. by R. G. Busnel (Laboratoire de Physiologie Acoustique, Jouy-en-Josas, 1967), pp. 363–382.
2. Г. Л. Заславский, А. А. Титов и В. М. Лекомцев, в сб. *Труды Акуст. института* (М., 1969), т. 8, сс. 134–138.
3. E. Sh. Airapetyants and A. I. Konstantinov, *Echolocation in Nature* (L., Nauka, 1974).
4. V. M. Belcovich and N. A. Dubrovskiy, *Sensory basis of cetacean orientation* (L., Nauka, 1976).
5. C. Hammer Jr., and W. W. L. Au, *J. Acoust. Soc. Am.* **68**, 1285 (1980).
6. P. E. Nachtigall, in *Animal Sonar Systems*, Ed. by R. G. Busnel and J. F. Fish (Plenum Press, New York, 1980), pp. 71–95.
7. W. W. L. Au and D. A. Pawloski, *J. Comp. Physiol. A* **172**, 41 (1992).
8. W. W. L. Au, *The Sonar of Dolphins* (Springer-Verlag, New York, 1993).
9. W. W. L. Au and M. C. Hastings, *Principles of Marine Bioacoustics* (Springer-Verlag, New York, 2008).
10. W. W. L. Au, B. K. Branstetter, K. J. Benoit-Bird, and R. A. Kastelein, *J. Acoust. Soc. Am.* **126** (1), 460 (2009).
11. В. М. Белькович и Ю. И. Нестеренко, *Природа* **7**, 71 (1971).
12. K. S. Norris and G. W. Harvey, *J. Acoust. Soc. Amer.* **56** (2), 659 (1974).
13. Н. А. Дубровский и Г. Л. Заславский, *Акуст. журн.* **3**, 409 (1975).
14. U. V. Ivanenko, E. P. Mironov, V. E. Stefanov, and M. P. Ivanov, *Proc. of IOA* **26** (6), (2004).
15. U. V. Ivanenko, V. E. Stefanov, and M. P. Ivanov, *Proc. of IOA* **26** (6), (2004).
16. J. C. Lilly, *Science* **139**, 116 (1963).
17. J. J. Dreher and W. E. Evans, in *Marine Bioacoustics*, Ed. by W.N. Tavolga (Pergamon Press, Oxford, 1964), vol. 1, pp. 373–399.
18. M. C. Caldwell and D. K. Caldwell, in *Animal Sonar Systems: Biology and Bionics*, Ed. by R. G. Busnel (Laboratoire de Physiologie Acoustique, Jouy-en-Josas, France, 1967), pp. 879–936.
19. L. M. Herman and W. N. Tavolga, in *Cetacean behavior: Mechanisms and functions*, Ed. by L.M. Herman (Wiley Interscience, New York, 1980), pp. 149–209.
20. M. C. Caldwell, D. K. Caldwell, and P. L. Tyack, in *The Bottlenose Dolphin*, Ed. by S. Leatherwood and R.R. Reeves (Academic Press, San Diego, 1990), pp. 199–234.
21. S. M. Dawson, *Ethology* **88** (4), 265 (1991).
22. K. S. Norris, B. Wursig, R. S. Wells, and M. Wursig, *M. Univ. of California Press, Berkeley, CA.* (1994).
23. V. M. Janik, *Science* **289** (5483), 1355 (2000).
24. M. H. Rasmussen and L. A. Miller, *Aquat. Mamm.* **28**, 78 (2002).

25. M. H. Rasmussen and L. A. Miller, in *Echolocation in Bats and Dolphins*, Ed. by J. Thomas, C. Moss, and M. Vater (Univ. of Chicago, Chicago, 2004), pp. 50–53.
26. M. H. Rasmussen, M. O. Lammers, K. Beedholm, and L. A. Miller, *J. Acoust. Soc. Am.* **120** (1), 510 (2006). doi:10.1121/1.2202865
27. V. A. Ryabov, *Open J. of Acoustics* **1**, 41 (2011). doi:10.4236/oja.2011.12006 Published Online September 2011. <http://www.SciRP.org/journal/oja>
28. M. O. Lammers, W. W. L. Au, and D. L. J. Herzing, *Acoust. Soc. Am.* **114** (3), 1629 (2003). doi:10.1121/1.1596173
29. M. O. Lammers, M. Schotten, and W. W. L. Au, *J. Acoust. Soc. Am.* **119** (2), 1244 (2006). doi:10.1121/1.2151804
30. V. A. Ryabov, Candidate's Dissertation (S-Pb, 1991).
31. V. A. Ryabov and G. L. Zaslavskiy, *G.L. Reports of NAS of Ukraine* **2**, 188 (1999).
32. G. L. Zaslavskiy and V. A. Ryabov, *Proc. IOA* **23** (4), 75 (2001).
33. G. L. Zaslavski, *Acoustics, Paris. 5005* (2008). [www.acoustics08-paris.org](http://www.acoustics08-paris.org)
34. M. O. Lammers and W. W. L. Au, *Marine Mammal Sci.* **19**, 249 (2003).
35. V. A. Ryabov, in *Marine Mammals of the Holarctic*, Ed. by Belkovich, V. M. Collection of scientific papers (Moscow: KMK, 2004), pp. 483–489.
36. V. A. Ryabov, *Natural Science* **2** (6), 646 (2010). doi:10.4236/ns.2010.26081 <http://www.SciRP.org/journal/NS>.
37. V. A. Ryabov, M. A. Polyakov, and N. G. Bibikov, *Biophysics.* **56** (3), 529 (2011).
38. B. A. Рябов, <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01mr01/367007592.pdf>

## Acoustic Signals and an Echolocation System of a Dolphin

V.A. Ryabov

*Karadag Natural Reserve of the National Academy of Sciences of Ukraine, Crimea, 334876 Ukraine*

Two-channel recording of acoustic signals from two-quasistationary dolphins suggests that a dolphin echolocation system is more complex than it was discussed earlier, and it has at least four sonars. In the present work the two-channel recording of signals, an analysis and interpretation of their functions were continued in terms of physical acoustics, signal theory and echolocation. The results indicate that the echolocation system of dolphins has four organs for producing five different type of probing signals, which suppose various mechanisms of their processing by a dolphin hearing, in compliance with six various types of sonars. The results are of importance to study an echolocation system of *Odontoceti* and improve sonars and radars.

*Key words: dolphin, sonar, acoustical, echo, signal, beam pattern, pack of pulses, radar*