

УДК 599.53

© М. П. Иванов¹, А. А. Родионов², Ю. А. Толмачев¹, Л. Е. Леонова¹, Е. В. Романовская¹, В. Е. Стефанов¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Россия

²Санкт-Петербургский филиал Института океанологии им. П. П. Ширшова, Россия

20mivanov@mail.ru; m.p.ivanov@spbu.ru

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЕРБАЛЬНОЙ КОММУНИКАЦИИ ЗУБАТЫХ КИТОВ

Статья поступила в редакцию 15.02.2018, после доработки 20.02.2018.

Исследовалось вербальное поведение белухи *Delphinapterus leucas* при акустической стимуляции шумоподобным сигналом во время демонстрации видеообразов. Видеообразы демонстрировались на подводном мониторе, а акустические стимулы транслировались с помощью динамика в полосе до 18 кГц. Представлены характеристики акустического стимула. Показано, что совместная трансляция видеоизображения с акустическим сопровождением стимулирует ответную акустическую реакцию животного с латентным периодом от 0,5 до 1,2 с. Подробно представлена ответная акустическая реакция длительностью 16 с, состоящая из 14 пакетов высокочастотных импульсов. Выделены пакеты со стабильной временной структурой с коэффициентом модуляции 0.175 ± 0.025 (пакет 1-го рода) и 0.91 ± 0.03 (пакет 2-го рода) и смешанные пакеты из двух пакетов 1-го рода и двух пакетов 1-го и 2-го рода. Проведенная серия экспериментов однозначно свидетельствует о том, что акустическую реакцию дельфина можно расценивать как вербальный ответ на видео и акустическое воздействие.

Ключевые слова: дельфины, вербальные сигналы коммуникации, пакеты импульсов.

M. P. Ivanov¹, A. A. Rodionov², Y. A. Tolmachev¹, L. E. Leonova¹, E. V. Romanovskaya¹, V. E. Stefanov¹

¹Saint-Petersburg State University, Russia

²Saint-Petersburg Department of the P. P. Shirshov Institute of Oceanology of RAS, Russia

LABORATORY STUDIES ON VERBAL COMMUNICATION OF TOOTHED WHALES

Received 15.02.2018, in final form 20.02.2018.

Verbal behavior of beluga whale *Delphinapterus leucas* acoustic ally stimulated by noise-like signal during demonstration of video images was studied. Video images were shown by an underwater monitor and acoustic stimuli were transmitted by a speaker in the frequency range up to 18 kHz. Characteristics of acoustic stimuli are presented. Demonstration of acoustic ally accompanied video images to the animal was shown to stimulate acoustic response of with a latent period of 0.5 to 1.2 seconds. Detailed acoustic response reaction of 16 s duration, consisting of 14 packages of high-frequency impulses is presented. Also presented are packages with a stable temporal structure: one package of the first type with a modulation coefficient of 0.175 ± 0.025 ; one package of second type with a modulation coefficient of 0.91 ± 0.03 and mixed packages consisting of two packages of the first type and other two of the first and second type packages. The conducted series of experiments clearly indicate that the acoustic reaction of the Dolphin can be interpreted as a verbal response to the video and acoustic impact.

Key words: dolphins, verbal communication signals, signals, pulse packs.

Ссылка для цитирования: Иванов М. П., Родионов А. А., Толмачев Ю. А., Леонова Л. Е., Романовская Е. В., Стефанов В. Е. Лабораторные исследования вербальной коммуникации зубатых китов // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2018. Т. 11, № 1. С. 74—79.

For citation: Ivanov M. P., Rodionov A. A., Tolmachev Y. A., Leonova L. E., Romanovskaya E. V., Stefanov V. E. On the use of reflection coefficient phase at hydroacoustic measurements of sea ice cover thickness. *Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika*. 2018, 11, 1, 74—79.

DOI: 10.7868/S2073667318010082

Интенсивные научные исследования сенсорных систем дельфинов позволяют перейти к новой фазе изучения их высшей нервной деятельности, а именно изучению когнитивных функций, в частности, системы акустической коммуникации [1, 2].

Акустический канал китообразных является наиболее информативным, поэтому акустический репертуар зубатых китов — самый разнообразный по сравнению с другими млекопитающими. Сигналы, издаваемые животными, выполняют различные функции. С помощью разных типов акустических сигналов дельфины ориентируются в водной среде, поддерживают связь друг с другом, обнаруживают и распознают различные подводные объекты [3]. Акустический канал не только дополняет зрительный канал, но и помогает вести активный образ жизни в вечерние и ночные часы, а также несколько месяцев в году жить в условиях полного отсутствия света (полярные регионы).

Для эхолокации дельфины используют одиночные импульсы и пакеты, состоящие из 2–30 импульсов [4, 5]. Эхолокационные импульсы сосредоточены во времени и не имеют выраженного спектрального максимума в широкой полосе частот. В технических системах сверхширокополосные сигналы (UWB) относят к сигналам «без несущей» (с неопределенной несущей). Использование сверхширокополосных сигналов существенно расширяет канал передачи информации и улучшает надежность передачи, что позволяет добиться лучших результатов при решении задач обнаружения и распознавания подводных объектов [6].

Вербальный коммуникационный процесс, предположительно, обеспечивается с помощью излучения длинных частотно-модулированных (ЧМ) [1] и частотно-манипулированных (ЧМн) сигналов, пакетов ультракоротких импульсов [7], а также смешанных сигналов, состоящих из пакетов ультракоротких импульсов и длинных ЧМ и ЧМн импульсов. Отметим, что идентификация акустических сигналов в многочисленных выполненных исследованиях, подтверждающих процесс коммуникации в этолого-акустических наблюдениях, была затруднительна, а подчас и невозможна из-за отсутствия у животных мимической реакции и движения челюстей [8, 9]. Для точного сопоставления вербальной коммуникации в ответ на зрительное и акустическое воздействие нами проведены прямые эксперименты с дельфином белухой *Delphinapterus leucas* с соответствующей технической поддержкой в условиях лабораторного опыта.

Для исследования когнитивных функций дельфинов был создан специализированный стенд с подводной частью, предназначенной для визуального и акустического контакта с животным, и надводной частью для работы экспериментатора с аналогичным визуальным и акустическим обеспечением. Стенд оборудован необходимыми техническими и программными средствами обеспечения видео и гидроакустического каналов с адресной передачей данных - дельфин-оператор, оператор-дельфин. Акустические опыты в этих экспериментах основаны на исследовании имитационного поведения.

Имитационное поведение характерно для всех млекопитающих, а для млекопитающих, использующих акустический канал связи, как основной источник информации. Акустическая имитация является одним из важнейших способов обучения детенышей и друг друга [9]. Наблюдения свидетельствуют о том, что дельфины способны имитировать широкий диапазон самых разнообразных звуков: от булькающих звуков, поднимающихся из аквалангов пузырьков воздуха, до отдельных слов и простых фраз, произносимых человеком [10]. Выполненные исследования способности дельфинов к имитации искусственных свистовых сигналов показали, что они легко справляются с этой задачей [11, 12]. Предполагается [10], что способность дельфинов к «вокальной» и моторной имитации является основой, на которой развиваются различные формы координированной групповой активности: синхронное плавание, коллективная охота, защитное поведение. В работе [13] рассматриваются парадоксальные сигналы вербальной активности двух афалин при отсутствии всякого воздействия со стороны экспериментатора. Более того, во время «акустического контакта» система излучения афалин находилась над поверхностью воды. Идентификация сигналов во время «акустического контакта» с ситуацией осложнена отсутствием управляемого лабораторного эксперимента.

Для создания эффекта сопричастности к происходящему в ходе экспериментов на экране монитора использовалась система акустической обратной связи (в тракте звуковой карты компьютера), с помощью которой дельфин самостоятельно включает подводный монитор. Программное обеспечение дает животному возможность управлять изображением на подводном мониторе в зависимости от условий, задаваемых оператором. При этом дельфин, изменяя амплитуду акустических сигналов в последовательности и частоту их следования, способен изменять изображение на экране.



Рис. 1. Работа белухи с подводным монитором (а); монитор экспериментатора (б)
Положение животного с веб-камеры (1); контроль акустической последовательности (2);
программа управления монитором (3); изображение на мониторе (4).

Fig. 1. Experimental work on the beluga whale with the underwater monitor (a); experimenter's monitor (b).
Animal's position in relation to the underwater monitor (1); acoustic sequence (2);
program-based operation of the monitor (3); image on the monitor (4).

С целью изучения вербальной коммуникации дельфинов и, в частности, имитирующего поведения в лабораторных условиях были выполнены исследования ответной реакции животного на звуковые сигналы оператора с использованием разработанного стенда. Стенд состоит из системы управления функциональными элементами, монитора, веб-камеры, источника звуковых сигналов, системы гидрофонов. Система регистрации включает три широкополосных канала с частотной полосой сквозного тракта записи до 600 кГц и частотой квантования 2.5 МГц. Система синхронизации акустического излучения дельфина и управления видеопотоком создана на низкочастотном канале звуковой карты компьютера. Искажения акустических сигналов, возникающие в звуковой карте, в данном случае не принципиальны. Во время эксперимента происходила регистрация изображения с монитора экспериментатора. Таким образом, можно было наблюдать все происходящее в эксперименте на одном мониторе. В работе использовался высокочастотный излучатель с полосой пропускания до 18 кГц.

Основной задачей выполненной серии экспериментов было изучение и точное сопоставление ответной реакции дельфина на звуковой сигнал оператора. В качестве такого сигнала использовались музыкальные фрагменты, дикторские тексты, белый шум, шум с включением музыкальных фрагментов и шум с дикторским текстом. Акустические сигналы во время работы дельфина с видеофрагментами включались в случайный момент времени.

По нашим наблюдениям музыкальные фрагменты, дикторские тексты и белый шум не приводили к ответной акустической реакции дельфина. Вместе с тем, на акустические сигналы, состоящие из смеси шума с музыкальными фрагментами, и с дикторским текстом отчетливо наблюдалась акустическая ответная реакция животного.

На рис. 2 представлена осциллограмма и динамический спектр стимула и ответного взрывоподобного сигнала в полосе до 22.0 кГц. Динамический спектр стимула расположен в полосе 6.0 кГц.

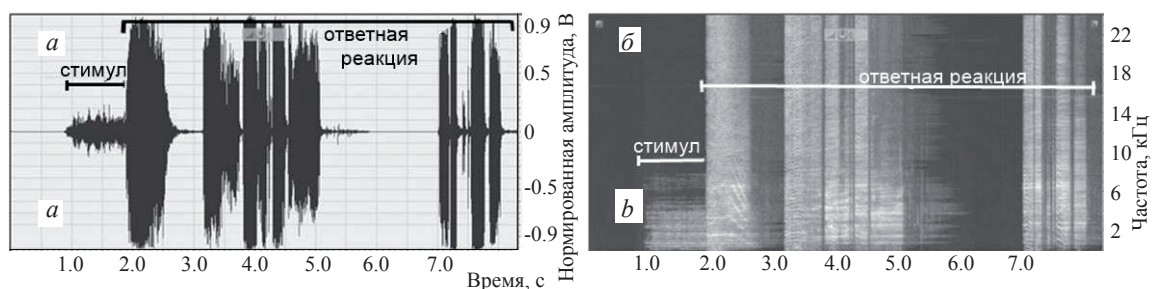


Рис. 2. Акустическое воздействие (стимул) и ответная реакция - серии взрывоподобных сигналов.
а – осциллограмма; б – динамический спектр воздействия.

Fig. 2. Acoustic impact and response of a series of explosion-like signals.
a – waveform; b - dynamic spectrum of the acoustic impact.

Всего было проведено 43 испытания, параллельно с акустическими воздействиями на экран монитора демонстрировались различные видео фрагменты. Отчетливая ответная акустическая реакция наблюдалась в 41 испытании. На рис. 3 представлена задержка ответной реакции на акустическое воздействие. Длительность ответа меняется от 0.15 до 3.0 с. В среднем время реакции составило 1.13 с, что сравнимо с реакцией человека на неожиданное воздействие. Обращаем внимание, что в этих опытах пищевого подкрепления или подкрепления другой модальности не проводили – полученная ответная акустическая реакция является исключительно эмоциональной.

Ожидаемая имитация акустического воздействия отсутствовала, но была получена вербальная ответная реакция в виде последовательности пакетов импульсов, которая представлена на рис. 4. Эти последовательности получены с помощью широкополосной записи на три гидрофона. Средний канал (рис. 4, б) – запись с центрального гидрофона, установленного между животным и подводным

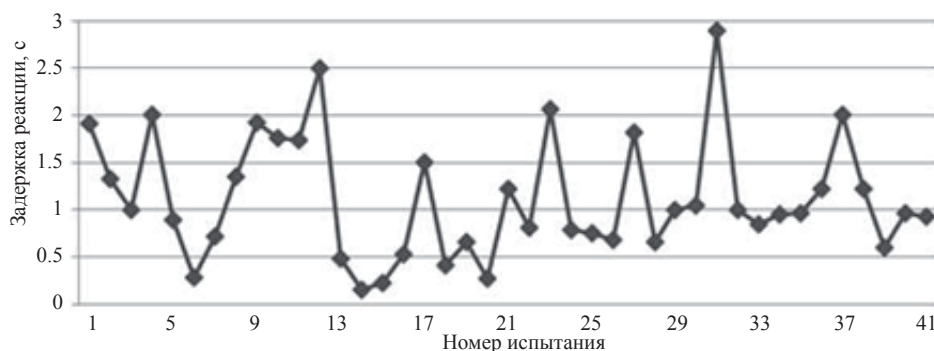


Рис. 3. Изменения задержки ответной реакции на акустическое воздействие в серии из 41 испытания.

Fig. 3. Changes in the delay of the response to the acoustic impact in a series of 41 tests.

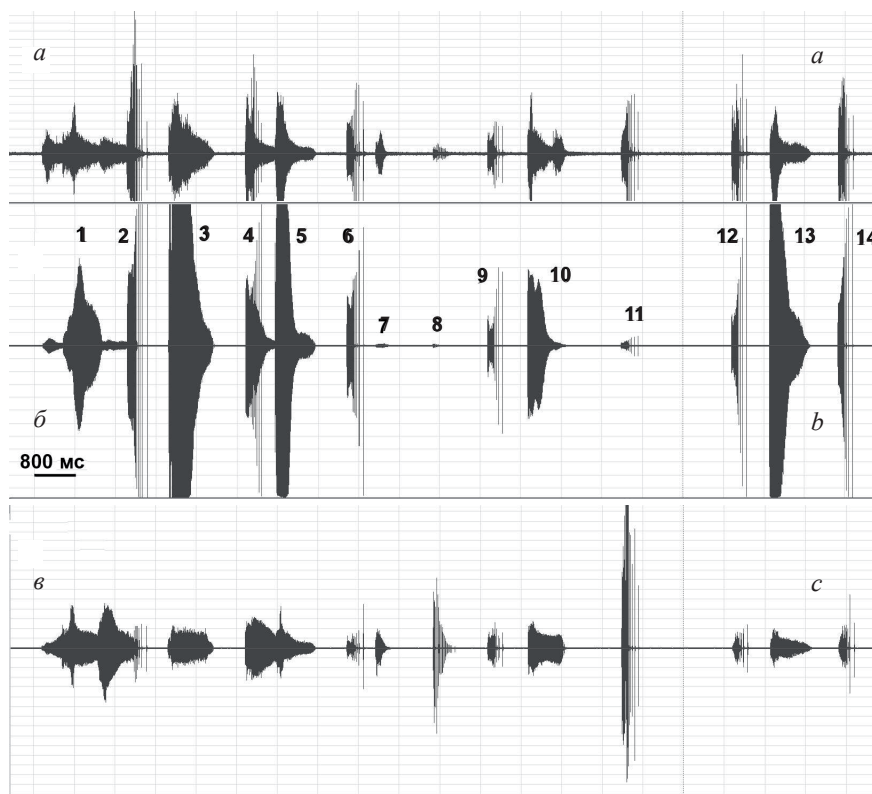


Рис. 4. Осциллограмма вербального поведения дельфина белухи длительность 16 с в ответ на акустическое воздействие.

a – гидрофон справа от животного; *б* – центральный гидрофон; *в* – гидрофон слева от животного.

Fig. 4. Waveform of the animal's verbal behavior lasting 16 seconds as response to the of the on the acoustic impact.

a - hydrophone situated right of the animal; *b* - central hydrophone; *c* - hydrophone situated left of the animal.

монитором, верхний и нижний канал – запись с гидрофонов, установленных в 2-х метрах слева (рис. 4, *с*) и справа (рис. 4, *а*) от центрального гидрофона, соответственно.

На отрезке 16 с (рис. 4) представлена осциллограмма вербального поведения белухи, состоящая из последовательности 14 пакетов импульсов. Сравнение импульсов по каналам показывает неравномерность излучения по амплитуде. Поэтому дальнейшая обработка проводилась по наилучшим показателям соотношения сигнал/шум. Например, пакеты 7, 8 и 11 на осциллограмме (рис. 4, *б*) имеют малую амплитуду, а более отчетливо эти пакеты представлены на осциллограмме на рис. 4, *с*.

Для наглядности представления особенностей ответной акустической реакции на акустическое воздействие был вычислен интервал между импульсами и построены соответствующие графические зависимости для каждого пакета импульсов. Представленная последовательность была выбрана по признаку совпадения всех сигналов на трех каналах. На осциллограммах (рис. 5) показаны результаты измерения длительности пакета (T) и количество импульсов (N) в пакете. На графике зависимости изменения интервала между импульсами от номера интервала по порядку (рис. 5) показаны результаты измерения минимального ($t_{\min}$) и максимального интервалов ($t_{\max}$), а также коэффициент модуляции (коэффициент разнообразия), вычисленного как $K_{\text{mod}} = (t_{\max} - t_{\min}) / (t_{\max} + t_{\min})$.

Рассматривая временную структуру пакетов, результаты измерений длительностей, вычисленные коэффициенты модуляции, можно заметить, что временные структуры некоторых пакетов имеют сходство. Пакеты 1-1, 1-2, 3, 4-2, 5, 10, 13 имеют близкие минимальные значения временных интервалов 2.9–5.0 мс и близкие максимальные значения 5.6–9.0 мс. Количество импульсов в этих пакетах колеблется от 38 до 136, а коэффициент модуляции меняется от 0.15 до 0.4 (пакеты 1-го рода). Пакеты 2, 4-1, 6, 9, 12, 14 имеют практически плоский участок с минимальным изменением интервалов 2.4–3.1 мс, с резким увеличением этой величины до 52–102 мс в конце пакета. Количество импульсов в пакетах меняется от 29 до 47 с коэффициентом модуляции 0.88÷0.94 (пакеты 2-го рода).

Пакеты 1 и 4 – это пакеты смешанного типа. Пакет 1 состоит из двух пакетов 1-го рода (1-1, 1-2), пакет 4 состоит из пакетов 1-го и 2-го рода (4-1, 4-2).

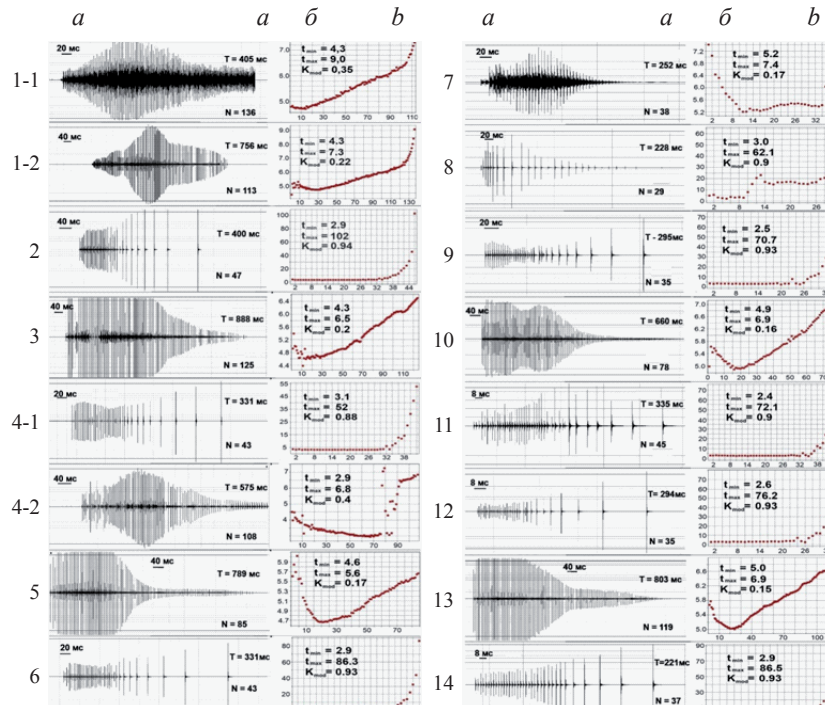


Рис. 5. Осциллограммы пакетов импульсов и их время-импульсная модуляция.

а – осциллограмма нормированных пакетов импульсов после фильтрации;

б – зависимость интервала между импульсами (мс) от номера интервала по порядку.

Fig. 5. Waveform pulses' packets and their time-pulse modulation.

a – waveform of normalized pulses' packets after filtration;

b – dependence of interval between pulses (ms) on the in-order number.

В пакетах с плохим соотношением сигнал/помеха структуры становятся «рыхлыми» и плохо читаемыми (пакеты 1 (1-1); 4 (4-2); 7; 8). Если не учитывать плохо читаемые пакеты, то значение коэффициента модуляции для пакетов 1-го рода составляет величину -0.175 ± 0.025 (пакеты 3, 5, 10, 13), а для пакетов 2-го рода -0.91 ± 0.03 (пакеты 2, 4-1, 6, 11, 12, 14), при этом величина отклонения не превышает ± 0.03 .

В представленной последовательности из 14 пакетов 10 пакетов имеют стабильную временную структуру, из них четыре пакета 1-го рода и шесть пакетов 2-го рода. Таким образом, в настоящее время в качестве вербальных сигналов можно рассматривать сигналы с: ЧМ (ЧМн); пакеты импульсов 1-го и 2-го рода; смешанные сигналы, состоящие из пакетов и ЧМ (ЧМн) сигналов; смешанных пакетов импульсов 1-го рода; смешанных пакетов 1-го и 2-го рода.

Проведенная серия экспериментов однозначно свидетельствует о том, что акустическую реакцию дельфина можно расценивать как вербальную ответ на видео и акустическое воздействие. Амплитуды пакетов импульсов в разных каналах значительно различаются (например, пакет 11), что свидетельствует об умении дельфина управлять характеристикой диаграммы направленности. Показано, что когнитивная функция выражается в попытке войти в вербальный контакт с изображением на подводном мониторе. В отличие от пассивного акустического наблюдения в данном эксперименте вербальная коммуникация спровоцирована экспериментатором, что свидетельствует об управляемости когнитивным процессом. Одинаковые структуры пакетов 1-го и 2-го рода, а также смешанные пакеты показывают разнообразие, которое наблюдается и интерпретируется только в этом эксперименте. Хорошее соотношение сигнал/помеха в зарегистрированных последовательностях позволило выявить характерные временные структуры и определить их параметры. Временные параметры выделенных вербальных сигналов инвариантны относительно угла наблюдения.

БЛАГОДАРНОСТИ. Авторы выражают благодарность и признательность Санкт-Петербургскому дельфинарию – всему тренерскому составу и штату сотрудников, а также лично директору Костову Игорю Евгеньевичу за предоставленную возможность проведения научных исследований.

Работа частично выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема № 0149-2018-0014).

Литература

1. Janik V. M. Cognitive skills in bottlenose dolphin communication // Trends Cogn Sci. 2013 Apr; 17(4): 157-9. doi: 10.1016/j.tics.2013.02.005. Epub. 2013. Mar 18.
2. Ivanov M. P. Communication of dolphins // Science in Russia. Russian Academy of Sciences. 2009. March-april. № 2. P. 11—17.
3. Rodionov A. A. Learn from dolphins // Science in Russia. Russian Academy of Sciences. March-April. 2007. № 2. P. 29—35.
4. Ivanov M. P. Dolphin's Echolocation Signals in a Complicated Acoustic Environment // Acoustical Physics. 2004. V. 50, N 4. P. 469—479.
5. Finneran J. J. Dolphin “packet” use during long-range echolocation tasks // J. Acoust. Soc. Am. 2013. 133, 960. P. 1796—1810.
6. Ivanov M. P., Stefanov V. E. Technique of experiments for studying echolocation and communication of dolphins under the effect of man-made interference // Symposium on Bio Sonar Systems and Bio-Acoustics, Institute Acoustics, Loughborough University, 2009.
7. Ivanov M. P. The Technique of Physiological Experiments on Acoustic Communication of Dolphins // Doklady Biological Sciences. 2008. V. 423. P. 375—378. DOI: 10.1134/S0012496608060021.
8. Belikov R. A., Bel'kovich V. M. Communicative pulsed signals of beluga whales in the reproductive gathering off Solovetskii Island in the White Sea // Acoustical Physics. 2008. 54 (1). P. 115—123.
9. Herman L. M., Tavorla W. N. The communication systems of cetaceans // Cetacean behavior: Mechanisms and functions / Ed. Herman, L. M. New York: Wiley Interscience, 1980. P. 149—209.
10. Herman L. M. Vocal, social and self-imitation by bottlenosed dolphins // Imitation in animals and artifacts / Ed. C. Nehaniv & K. Dautenhahn. Cambridge mamit Press, 2002. P. 63—108.
11. Richards D. G., James P. W., Herman L. M. Vocal Mimicry of Computer-Generated Sounds and Vocal Labeling of Objects by a Bottlenosed Dolphin, Tursiops truncatus // Journal of Comparative Psychology. 1984. V. 98, N 1. P. 10—28.
12. Herman L. M., Morrel-Samuels P., Pack A. A. Bottlenosed dolphin and human recognition of veridical and degraded video displays of an artificial gestural language // Journal of experimental psychology: General. 1990. 119. P. 215—230.
13. Ryabov V. A. The study of acoustic signals and the supposed spoken language of the dolphins // St.-Petersburg Polytechnical University Journal: Physics and Mathematics. 2016. № 2. P. 231—239. doi: 10.1016/j.sjpm.2016.08.004.