

Эксперимент по исследованию коммуникации китообразных

М.П. Иванов* Е.В.Дроган†

*Санкт-Петербургский государственный университет,
биологический факультет, кафедра биофизики,
Россия, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб. д. 7–9
(Статья поступила 13.11.2014; Подписана в печать 03.12.2014)*

Развитие исследований по акустической коммуникации китообразных переходит порог от процесса накопления эмпирических данных к прямому эксперименту. Проведен анализ эмоциональных сигналов афалины и белухи, которые представляют собой пакки коротких импульсов длительностью от 80 до 600 мс с неэквидистантной последовательностью импульсов в диапазоне от 1,8 до 6 мс. Широкополосная регистрация эмоциональных сигналов белухи показала, что спектральная плотность зарегистрированных импульсов достигает 500 кГц и более, что противоречит известной частотно–пороговой характеристике приемной системы зубатых китов.

PACS: 43.80.Ka, 43.80.Lb УДК: 534.87, 57.026

Ключевые слова: сигналы коммуникации китообразных.

ВВЕДЕНИЕ

У китообразных по сравнению с другими млекопитающими акустический канал наиболее приспособлен к коммуникационной связи между индивидами, а расшифровка коммуникационных сигналов животных является одной из самых интригующих задач. Начало исследований коммуникации дельфинов относится к 1961 году [1], однако основные вопросы так и остались нерешенными. Несмотря на очевидную вокализацию между животными, до сих пор отсутствует однозначная интерпретация коммуникационных сигналов и двигательных поведенческих актов неоспоримого коммуникационного поведения.

Основная проблема исследований в данной области связана с тем, что не существует методики изучения коммуникационного взаимодействия высших животных в лабораторном эксперименте, то есть методики, позволяющей однозначно сопоставить сигналы коммуникации с информационной нагрузкой и двигательным поведением животных.

Методическое решение коммуникационных экспериментов, поставленных на дельфинах в лабораторном опыте, основано на альтруистическом поведении животных [2, 3]. Статистическая оценка двигательных актов во время эксперимента показывает, что дельфины способны передавать информацию партнеру и тем самым координировать поведение друг друга. Несмотря на оптимистический вывод в представленных работах [3], повторения коммуникационных экспериментов не последовало.

В данной работе представлены результаты двух экспериментов с провокацией акустического коммуникационного поведения. Первый эксперимент основан на решении задачи распознавания подводных объектов

дельфинами афалинами в условиях естественной активной импульсной помехи, создаваемой экспериментальными животными. Второй эксперимент проведен на дельфине белухе при демонстрации видеоряда с помощью подводного монитора и акустической ответной реакции на спонтанное звуковое воздействие в низко-частотной области спектра.

С точки зрения теории сигналов самой сложной помехой является сосредоточенная помеха — помеха, которая по частотно-временным характеристикам совпадает с зондирующим сигналом и полностью перекрывает спектр эхосигнала. Борьба с подобными помехами является одной из самых трудных технических задач в гидроакустике. Для технических систем решение такой задачи практически нереализуемо. Однако для китообразных работа в таких сложных условиях является тривиальной задачей, т. к. они постоянно находятся в сложной акустической обстановке, например, при коллективной охоте.

Моделирование подобной ситуации в эксперименте и провокация коммуникационного поведения заключается в том, что дельфины должны как бы «договориться» о том, кто из них решает задачу в конкретный момент времени.

Демонстрация видеороликов под водой со спонтанным акустическим воздействием представляет собой случайный процесс с неожиданным исходом, который может привести к ответной акустической реакции.

1. МЕТОДИКА

Первый эксперимент проводился в закрытом бассейне размером 12×6 м² и глубиной 6 м. В опыте участвовало два половозрелых самца афалины в возрасте 17 лет. На стадии обучения животные разнесены в пространстве (рис. 1а) и отгорожены друг от друга непрозрачным пластиковым экраном.

В качестве объектов распознавания использовались две мишени: стимул 1 — свинцовый цилиндр (∅ 30

*E-mail: 20mivanov@mail.ru

†E-mail: elendrogan@gmail.com

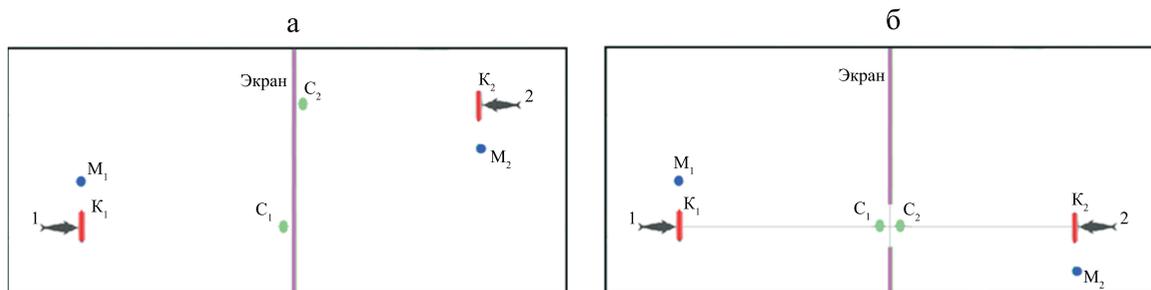


Рис. 1: Схема эксперимента при решении задачи распознавания подводных объектов в условиях естественной активной импульсной помехи; С1 — место предъявления стимула 1 и 2 для животного 1; С2 — место предъявления стимула 1 и 2 для животного 2; К1, К2 — кольцо фиксированного старта; М1, М2 — манипулятор ответной реакции; а — положение животных при обучении; б — положение животных в эксперименте

длиной 50 мм для дельфина 1 и $\varnothing 35$ длиной 60 мм для дельфина 2), стимул 2 — стальная трубка ($\varnothing 35$ мм длиной 50 мм для дельфина 1 и $\varnothing 40$ мм длиной 60 мм для дельфина 2). Стимулы погружались параллельно для первого и второго дельфинов в секторе обзора (рис. 1 место предъявления стимула С1, С2). Двигательная реакция животных на стимул 1 — оставаться на старте в кольце, а на стимул 2 — выйти из кольца и обозначить реакцию касанием манипулятора ответной реакции. Время экспозиции стимула 1 составляло 5–20 с, время экспозиции стимула 2 определялось самим животным, при этом латентный период не превышал 5 с. Пищевое подкрепление проводилось после каждого правильного решения.

Во время эксперимента дельфины расположены напротив друг друга (рис. 1б) при отсутствии пластиковой перегородки. При решении задачи объекты распознавания располагаются посередине между стартовыми позициями. Сектор обзора одного животного перекрывает сектор обзора другого животного, при этом импульсы, излучаемые при решении задачи одним животным, являются помехой для выполнения задачи другим животным.

Стартовая позиция дельфинов одинакова: оба животных находятся в кольце на глубине 1 м. Регистрирующие гидрофоны и стимулы (С1, С2) также погружались на глубину 1 м. Расстояние между кольцами составляло 8 м. Два гидрофона располагались на прямой, соединяющей центры кольца — стартовой позиции. Третий гидрофон служил реперной точкой и располагался в стороне от стартовой позиции. При обработке данных три гидрофона позволяют точно идентифицировать сигналы излучающего животного. Аналоговые сигналы переводились в цифровую форму с помощью 4-х канального АЦП Е20-10 с частотой квантования 2,5 МГц на канал: 2 канала — в полосе частот до 600 кГц (гидрофоны $\varnothing 2$ мм), два канала — в полосе до 20 кГц (3-й канал с гидрофона $\varnothing 35$ мм), четвертый канал использовался для записи комментариев в процессе эксперимента. Управление АЦП и хранение информации проводилось на промышленном микрокомпьютере.

Второй эксперимент проводился в закрытом бассейне размером 30×20 м с переменной глубиной от 1 до 6 м. Дельфин белуха находился в отсеке размером 6×6 м и глубиной 2 м (рис. 2).

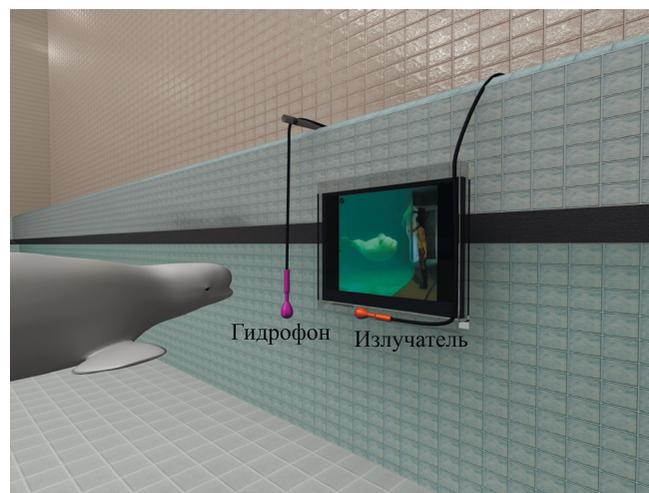


Рис. 2: Эксперимент с трансляцией видеоизображения с акустической стимуляцией

Трансляция видеоизображения проводилась с помощью подводного монитора. В качестве изображения использовались различные видеосюжеты с участием дельфинов белух. С помощью сигналов эхолокации в специально созданном программном обеспечении дельфину предоставлена возможность останавливать видеоизображение или продолжать транслирование. Эксперимент проводился непрерывно в течение 4 часов без пищевого подкрепления. Трансляция видеоизображения с использованием обратной связи позволила непрерывно удерживать внимание животного у монитора до 7 минут, а общее время удержания внимания у монитора в одном опыте составило 2 часа. Всего было поставлено 16 опытов. В одном опыте была проведена акустическая стимуляция шумоподобным сигналом.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ проведенных записей с использованием первой методики позволил однозначно выделить фрагменты, соответствующие началу и концу испытания. Во всех акустических последовательностях выделяются сигналы подхода к кольцу каждого из дельфинов. Причем одно животное при подходе к кольцу использовало последовательность импульсов с модуляцией временного интервала между импульсами. Другое животное в процессе ориентации и подхода к кольцу всегда использовало длинные частотно-модулированные импульсы — свисты с частотой несущей 1220,7 Гц. При выходе животного из кольца отчетливо наблюдаются длинные низкочастотные сигналы длительностью ~270 мс, возникающие при движении дельфина к манипулятору, а также сигналы длительностью ~75 мс при контакте рostrумом с манипулятором ответной реакции. Полученные записи однозначно интерпретируемы. Каждый акустический сигнал можно сопоставить с экспериментальной обстановкой. Выделенные акустические сигналы начала и конца испытания связаны с двигательной активностью дельфина.

На основании анализа эхолокационной активности при отсутствии помехи наблюдается изменение амплитуды последовательности импульсов, при этом частота следования импульсов однозначно связана с дальностью до цели и варьирует от 30 до 40 мс. При воздействии помехи, т. е. при одновременной работе двух животных, наблюдалось две стратегии акустического поведения.

Первая стратегия — каждое животное поочередно излучает последовательность пакетов импульсов, так чтобы они не перекрывались по времени (рис. 3а). Вторая стратегия заключалась в том, что каждое животное излучает каждый последующий импульс, встраиваясь между импульсами второго животного, которое является для него помехой, так чтобы импульсы не перекрывались по времени. При этом интервал между импульсами увеличивается от 40 до 80 мс (рис. 3б).

В ходе экспериментов при решении задачи распознавания предметных стимулов в условиях акустических помех, создаваемых другим животным, было зарегистрировано три сигнала, которые можно интерпретировать как коммуникационные. Именно после этих сигналов наблюдалось изменение стратегии работы животных при локации объектов распознавания. На рис. 4а представлен один из сигналов коммуникации длительностью 600 мс как наиболее показательный.

Спектральная плотность импульсов анализировалась с помощью программы PowerGraph, размер БПФ 1024, весовая функция Hamming [4]. Для примера, ниже представлена спектральная плотность и осциллограмма двух импульсов из последовательности коммуникационного сигнала (рис. 5а и б). Выделенные импульсы визуально похожи, но при этом спектральная плотность для них разная. В первом импульсе имеется один

выраженный максимум на частоте 97 кГц, а для второго импульса выделяются два частотных максимума — 43 кГц и 102 кГц. Ширина основного лепестка частотной характеристики составляет 240 кГц, в то время как у эхолокационных импульсов ширина основного лепестка частотной характеристики не превышает 170 кГц.

Поскольку все импульсы в коммуникационной последовательности по спектрам очень разные, обрабатывать большие массивы при отсутствии надежного алгоритма обработки спектральных данных не представляется возможным.

Временная обработка коммуникационных сигналов на макро- и микро-уровне позволяет выделить некоторые отличия по сравнению с эхолокационными сигналами.

Под макро-обработкой понимается вычисление интервала между импульсами. На рис. 6 представлена зависимость изменения интервала между импульсами от номера импульса по порядку. Длительность интервала между импульсами для сигнала афалины (рис. 6а), состоящего из 250 импульсов, изменяется от 1,8 до 2,1 мс при точности измерения 0,4 мкс. Кривая имеет плавный характер, а некоторые изменения кривой не превышают 0,02 мс.

Обработка коммуникационных сигналов по микро-временным параметрам включает в себя следующие измерения: длительность основного периода колебательного процесса, длительность установившегося режима (длительность между экстремумами), длительность фронта нарастания, длительность фронта спада.

Графики измерения микро-временных параметров представлены на рис. 7. Изменение длительности основного периода и длительности установившегося режима свидетельствует о том, что на разных участках временной последовательности импульсы отчетливо разделяются (рис. 7а и в). Длительность основного периода меняется от 9 до 26 мкс, а длительность установившегося режима импульса изменяется от 4 до 11 мкс. Если сравнить эти два графика, то можно заметить некоторое сходство в распределении плотности скоплений, но только в начале и в конце последовательности.

Во втором эксперименте с дельфином белухой при демонстрации видеофрагментов были зарегистрированы сигналы ответной реакции на акустическую стимуляцию. Данная серия сигналов значительно отличается от эхолокационных импульсов и интерпретируется как сигналы коммуникации (рис. 4б).

Осциллограммы и спектральные характеристики двух импульсов из коммуникационной последовательности сигналов белухи представлены на рис. 5в и рис. 5г. Из осциллограмм видно, что общая длительность колебательного процесса составляет 60 мкс, а спектр имеет сильную изрезанность с максимумами на частотах 112 кГц, 161 кГц и на частотах, значительно превышающих 200 кГц. Спектральные максимумы на частотах 500 кГц и более имеются у всех импульсов

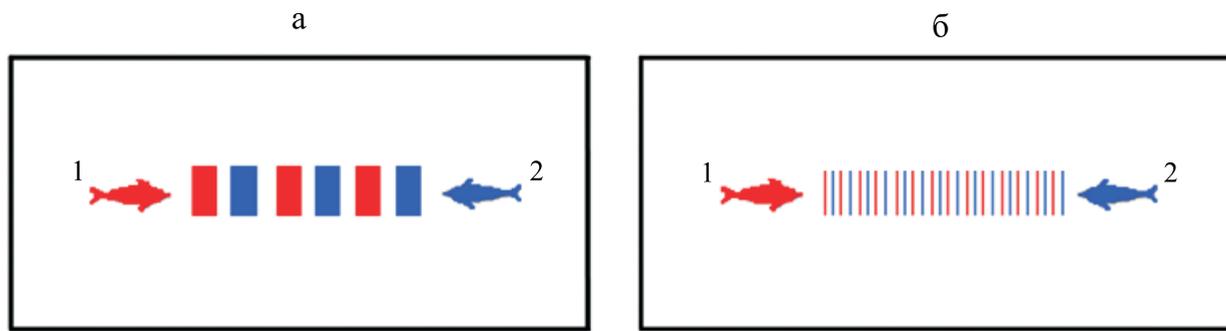


Рис. 3: Две стратегии акустического поведения дельфинов при распознавании подводных объектов в условиях помехи

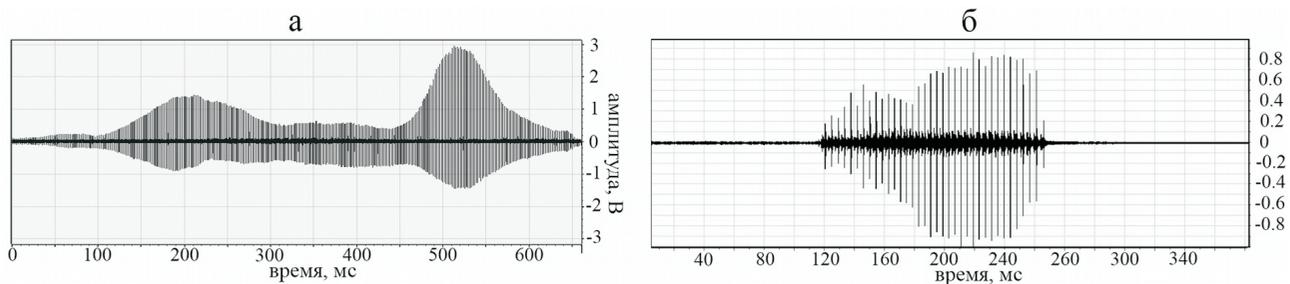


Рис. 4: Сигналы коммуникации: а – афалина; б — белуха

в данной последовательности и минимум осцилляций на частотах ниже 100 кГц.

Длительность коммуникационного сигнала, представленного на рис. 4б, составляет ~ 144 мс и содержит 35 импульсов. График макро-временных параметров, а именно, интервал между импульсами представлен на рис. 6б, который меняется от 4 до 4,65 мс и имеет плавный характер. Однако большая часть графика имеет некоторые особенности: каждый последующий интервал по сравнению с предыдущим меняется с интервалом $\sim 0,02$ мс, но с 27 по 35-й интервал график изменяется плавно. График изменения микро-временных параметров, а именно, длительность основного периода представлен на рис. 7б, на котором видно изменение длительности от 3,6 до 6,0 мкс. Как видно из графика, сигнал делится на две равные части: первая часть (с 1 по 16 импульс) имеет длительность первого периода $4,0-6,0$ мкс, а вторая часть (с 17 по 35 импульс) имеет постоянную длительность первого периода $4,0 \pm 0,4$ мкс. График изменения длительности между экстремумами в сигнале коммуникации представлен на рис. 7г, в котором длительность установившегося режима меняется от 1,6 до $4 \pm 0,4$ мкс, причем большая часть импульсов имеет длительность $2 \pm 0,4$ мкс, шесть импульсов имеют длительность $3,2 \pm 0,4$ мкс (4, 5, 7, 9, 11, 12), и только у двух импульсов длительность составила 4 мкс. При сравнении графиков рис. 7б и 7г восемь импульсов имеют синхронное увеличение длительности, как основного периода, так и длительности установившегося режима.

Длительность изменения фронта нарастания и фронта спада в данной работе не показана. Полученные результаты показывают разброс временных и спектральных параметров коммуникационных сигналов. Сказать уверенно, что это связано с информационной нагрузкой, невозможно. На сегодняшний день экспериментального материала недостаточно и существуют ограничения для алгоритмов обработки таких быстропротекающих процессов. В работе [5] такие сигналы характеризуются как универсальные, но по нашему мнению классифицировать такие сигналы еще рано. Сейчас нужно понять, какие признаки отличают сигналы эхолокации от сигналов коммуникации. В этой же работе [5] предлагается разделение сигналов на когерентные (эхолокационные последовательности импульсов) и некогерентные (коммуникационные последовательности импульсов). Данное определение, возможно, хорошо работает, если сигналы зарегистрированы в условиях, когда геометрическая и акустическая оси совпадают. Однако вся картина разрушается, когда происходит регистрация сигналов при отклонении от акустической оси, и в этом случае эхолокационные импульсы приобретают дополнительные колебания. В коммуникационных сигналах дополнительные колебания значительно увеличивают общую длительность импульса, а высокочастотные составляющие значительно уменьшаются по амплитуде [6]. Результаты спектрального анализа импульсов коммуникационного сигнала показывают, что, действительно, помимо основного импульса в сигнале присутствуют дополнительные колебания,

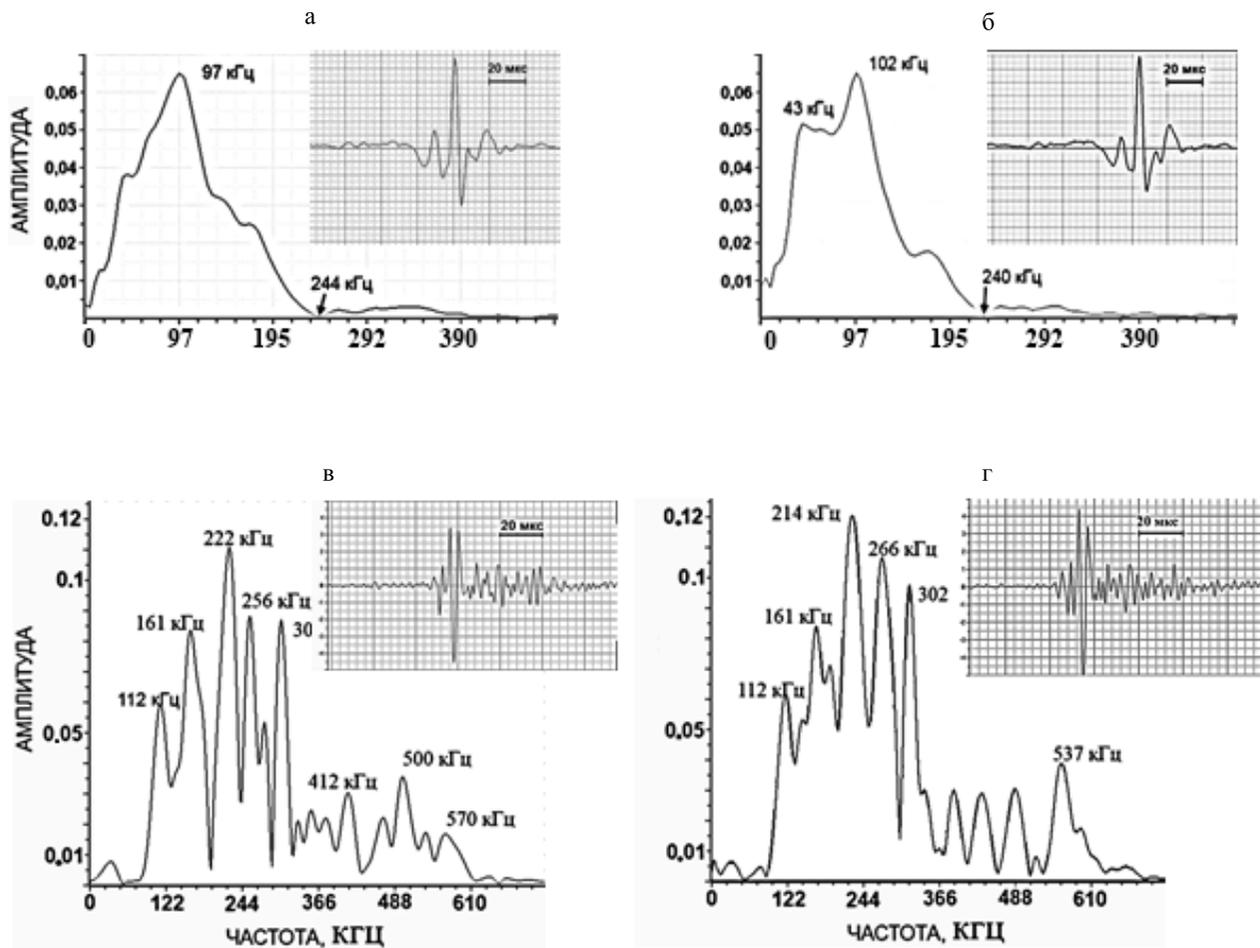


Рис. 5: Спектральная плотность и осциллограммы импульсов из последовательности коммуникационного сигнала: а, б — афалина; в, г — белуха

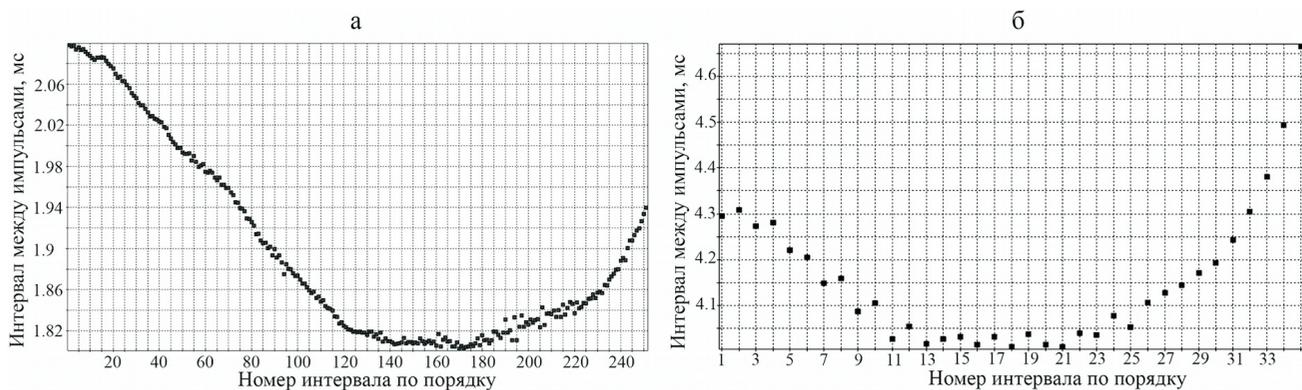


Рис. 6: Зависимость изменения интервала между импульсами от номера импульса по порядку: а — афалина; б — белуха

что ярко выражено на осциллограммах. Можно предположить, что такие сигналы являются продуктом излучения дополнительного генератора, который включается при излучении сигналов, подобных сигналам коммуникации [7, 8].

В эксперименте с демонстрацией видеоизображений Л. Херман [9] использовал абстрактные образы с изображением человека, передающего дельфину информацию с помощью языка жестов. Эти исследования показали, что дельфины воспринимают происходящие на

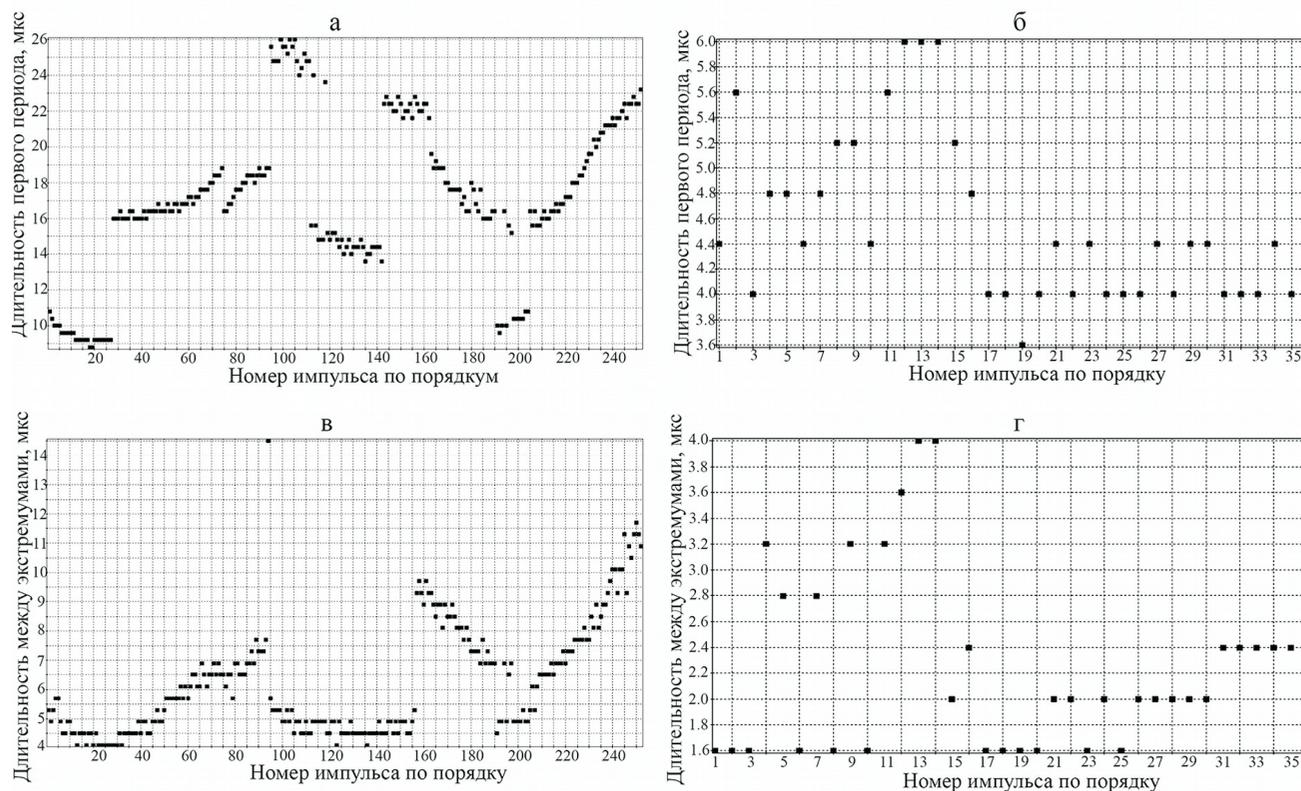


Рис. 7: Графики микро-временной обработки сигналов коммуникации: длительность основного периода (а, б); длительность установившегося режима импульса (в, г); а, в — афалина; б, г — белуха

телевизионном экране сцены и реагируют на них как на реальные события, но удержание внимания животных у монитора не превышало 20 с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ экспериментальных данных показал, что при использовании обратной связи время удержания внимания у монитора увеличивается до 7 минут, а введение акустической стимуляции приводит к коммуникационному ответу. Коммуникационный ответ получен только в одном опыте в течение 49 испытаний, но этого достаточно, т. к. пищевого подкрепления не проводилось. Ответная акустическая реакция ярко выражена, а для некоторых импульсов получены парадоксальные результаты, связанные со смещением спектра в область частот более 500 кГц. Не исключено, что данный феномен объясняется точной локализацией коммуникационного сигнала по акустической оси, т. к. диаграмма направленности на таких высоких частотах должна

быть меньше одного градуса. Полученный результат не соответствует известной частотно-пороговой характеристике слуха морских млекопитающих, которая ограничена 200 кГц.

Развитие эксперимента с использованием пространственно разнесенной сосредоточенной помехи требует модификации опыта, так, чтобы провокация коммуникационного взаимодействия была более наглядно выражена.

Использование обратной связи как в видеофрагментах, так и в акустической стимуляции дает возможность проведения новых экспериментов по вызванной коммуникационной активности.

Авторы выражают благодарность и признательность отделению Евпаторийского дельфинария — всему тренерскому составу и штату сотрудников базы «Донузлав» и лично директору Масбергу Игорю Валентиновичу. А также благодарим Санкт-Петербургский дельфинарий и лично директора Костова Игоря Евгеньевича за предоставленную возможность проведения исследований.

[1] Lilly J.C. Miller A.M. Science. **134**, N 3493. (1964).
 [2] Bastian J. The transmission of arbitrary environmental

information between bottlenose dolphins. Animal sonar systems R.G. Juoy-Josas (France). P. 807. (1967).

- [3] *Zanin A.V., Markov V.I., Sidorova I.E.* The ability of bottlenose dolphins, *Tursiops truncatus* to report arbitrary information. *Sensory Abilities of Cetaceans. Laboratory and Field Evidence*, eds.: J.A. Thomas, R.A. Kastelein, NATO ASI Series, Ser. A. **196**. P. 685. (Plenum Press. NY-London, 1990).
- [4] *Измайлов Д.Ю.* Виртуальная измерительная лаборатория PowerGraph ПиКАД. №3. С. 42. (2007). [электронный ресурс] Режим доступа. URL: <http://www.powergraph.ru/soft/pgview.asp> (дата обращения 23.04.2014).
- [5] *Рябов В.А.* Биофизика. **59**, вып. 1. С. 169. (2014).
- [6] *Branstetter B.K., Moore P.W., Finneran J.J., Tormey M.N., Aihara H.* J. Acoust. Soc. Am. **131**, N2. P. 1613. (2012).
- [7] *Cranford T. W., Elsberry W. R., Van Bonn W. G., Jeffress J. A., Chaplin M. S., Blackwood D. J., Carder D. A., Kamolnick T., Todd M. A., and Ridgway S. H.* J. Exp. Mar. Biol. Ecol. N407. P. 81. (2011).
- [8] *Lammers, M. O., and Castellote, M.* Biol. Lett. N5. P. 297. (2009).
- [9] *Herman L. M., Morrel-Samuels P. and Pack A. A.* Journal of Experimental Psychology: General. N119. P. 215. (2009).

Experimental study of cetaceans' communication

M. P. Ivanov^a, E. V. Drogan^b

Department of Biophysics, Biological Faculty, St. Petersburg State University, St. Petersburg 199034, Russia E-mail:

^a20mivanov@mail.ru, ^belendrogan@gmail.com

The process of accumulating empirical data in scientific research on acoustic communication of cetaceans is entering the stage of actual experiment. We analysed «emotional» signals of bottlenose dolphin (*Tursiops truncatus*) and beluga whale (*Delphinapterus leucas*) represented with non-equidistant sequences of short pulses ranging from 1.8 to 6 ms within the bursts of pulses 80–600 ms long. Broadband recording of «emotional» signals of beluga whale revealed that spectral density of the recorded pulses could be up to 500 kHz and even more, which contradicts the common frequency–threshold characteristics of the receiving system of toothed whales.

PACS: 43.80.Ka, 43.80.Lb

Keywords: communication signals, cetaceans.

Received 13.11.2014.

Сведения об авторах

1. Иванов Михаил Павлович — канд.биол.наук, заведующий лабораторией; тел: 8 (911) 942-54-78, e-mail: 20mivanov@mail.ru.
2. Дроган Елена Викторовна — инженер-исследователь, тел: (812) 774-71-43, e-mail: elendrogan@gmail.com.