

**Сравнительная оценка эхолокационных и коммуникационных сигналов дельфинов**

М. П. Иванов<sup>1,\*</sup>, Н. Г. Бибиков<sup>2,†</sup>, Н. А. Данилов<sup>3</sup>, П. А. Соколов<sup>3</sup>,  
Б. В. Романов<sup>4</sup>, Б. Ю. Красницкий<sup>4</sup>, В. Е. Стефанов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет

Россия, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб. д. 7/9

<sup>2</sup>Акционерное общество «Акустический институт имени академика Н. Н. Андреева»  
Россия, 117036, Москва, ул. Шверника, д. 4

<sup>3</sup>Государственный научно-исследовательский институт прикладных проблем»  
Россия, 191167, Санкт-Петербург, наб. Обводного канала, д. 29

<sup>4</sup>«Карадагская научная станция им. Т. И. Вяземского — природный заповедник РАН»  
Россия, 298188, Крым, Феодосия, Курортное, ул. Науки, д. 24

(Статья поступила 12.11.2019; подписана в печать 15.01.2020)

Произведен анализ сигналов дельфинов, осуществляющих поиск подводных объектов на больших дистанциях в сложных условиях антропогенных помех. Показано, что при коммуникационном поведении в этих условиях дельфины также используют похожие пакеты ультракоротких импульсов (УКИ). С помощью разработанного алгоритма обработки звуковых файлов выделены некоторые характерные последовательности сигналов, которые однозначно связаны с условиями лабораторного опыта. Это позволило найти закономерности и различия в пакетах сигналов. Интервал между пакетами импульсов зависит от дальности до объекта поиска и, как правило, больше, чем время, необходимое для их анализа идеальному наблюдателю. В режиме вербального взаимодействия дельфины используют сложные составные сигналы, состоящие из пакетов УКИ и ЧМ импульсов. Пакеты коммуникационных сигналов изменяются по длительности (от 120 мс до 1100 мс) и количеству (от 25 до 100 импульсов). Имитация сигналов китообразных позволяет создать набор скрытых сигналов, которые будут восприниматься оператором как сигналы, принадлежащие животным. В условиях шельфа скрытую передачу гидроакустической информации с использованием биоподобных сигналов можно также создать на основе имитации коротких широкополосных (больше 100 кГц) звуков раков-щелкунов, которые к настоящему времени становятся весьма обычными не только в тропических и субтропических акваториях, но и в умеренных европейских и дальневосточных водах.

PACS: 43.80.Ka, 43.80.Lb

УДК: 534.785

Ключевые слова: биоподобные сигналы, скрытность, пакеты эхолокационных и коммуникационных сигналов.

**ВВЕДЕНИЕ**

Использование гидроакустического канала многими гидробионтами является актуальной задачей, как наиболее информативного канала в водной среде в процессе поиска пищи и для связи между особями. При этом в отличие от технических систем, морские животные используют, как правило, сигналы с относительной широкополосностью, приближающейся к 1 (сверхширокополосные или сигналы без «несущей», псевдодельта импульсы, биполярные импульсы) [1]. Изучение таких сигналов связано с технологическими трудностями регистрации в условиях открытого пространства и лабораторного эксперимента с последующей адекватной интерпретацией результатов опытов. Технологические трудности связаны с необходимостью использования чрезвычайно широкой полосы частот сквозного тракта регистрации, разработки методических приемов многоканальной регистрации в условиях эхолокационных измерений и измерений в условиях кон-

тролируемого лабораторного эксперимента, программного обеспечения для регистрации на цифровой носитель, а также обработки таких сигналов и наглядного графического представления результатов измерения.

В технических гидроакустических системах используют, как правило, узкополосные сигналы в связи с применением резонансных датчиков, что позволяет получить наилучшие результаты при создании приёмно-излучающих антенн. При использовании узкополосных систем гидроакустической связи возникает проблема безопасности, поскольку не обеспечивается секретность, конфиденциальность и скрытность при приеме/передаче информации и довольно легко осуществить подмену источника (низкая имитостойкость). Сверхширокополосное излучение, использующее биоподобные сигналы, создает условия высокой защиты канала приема/передачи, что является новым средством обеспечения скрытности. Наиболее удачными объектами для их имитации являются звуки дельфинов в открытом море и раков-щелкунов в шельфовой зоне.

Процесс имитации сигналов основан не только на формировании сигналов подобию, но и знаний обстоятельств и сценариев применения гидробионтами имитируемых сигналов. Нами обнаружено, что дельфины

\*E-mail: 20mivanov@mail.ru

†E-mail: nbibikov1@yandex.ru

используют похожие пакеты ультракоротких импульсов как при решении задачи поиска на больших дистанциях, так и в процессе внутривидовой коммуникации. Аналогичная картина наблюдается при изучении длинных частотно-модулированных (ЧМ) импульсов, излучаемых дельфинами во время коммуникации и ориентации. При этом существуют сложности однозначной интерпретации многих сложных сигналов, состоящих из пакетов простых ультракоротких импульсов (УКИ) и импульсов с ЧМ, т.е. составных сигналов.

Цель работы – сравнительная оценка биоакустической активности и интерпретация результатов измерений параметров сигналов гидробионтов представителей Белого и Черного морей (*Delphinapterus leucas*, *Tursiops truncatus ponticus* и рачка-щелкуна), использующих сверхширокополосные гидроакустические простые и сложные сигналы.

Для последующей обработки выбраны акустические записи, полученные в условиях лабораторного опыта при решении задачи обнаружения подводных объектов на различных дистанциях и коммуникационного эксперимента с использованием акустической и видео обратной связи. В этих экспериментах методические приемы разработаны так, что акустическое и двигательное поведение однозначно интерпретируются. В этих опытах используется широкополосная многоканальная система регистрации биоакустической активности в условиях полного контроля акустической и видео обстановки, связанной с решением конкретной акустической задачи. Эта же аппаратура использовалась при регистрации акустической активности рачка-щелкуна в шельфовой зоне Черного моря. Регистрация сигналов и возможность их предварительной обработки заложены в программном комплексе PowerGraph и собственном программном обеспечении для временного анализа сверхширокополосных сигналов.

## 1. МЕТОДИКИ, АППАРАТНОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Наиболее достоверные сигналы эхолокации регистрируются в лабораторном эксперименте при решении дельфином задачи обнаружения подводных объектов в открытой воде в статическом режиме эхолокации при удалении объекта поиска на различные дистанции [2, 3] и в сложных условиях преднамеренных акустических помех [4]. В этих экспериментах сигналы эхолокации регистрировались с помощью двухканальной системы аналоговой регистрации в полосе частот до 200 кГц с последующей цифровой системой хранения информации при частоте квантования 3 МГц. Для точной идентификации эхолокационной последовательности, принадлежащей дельфину, участвующему в эксперименте, сигналы регистрировались в середине слоя воды (глубина бухты 4 метра в 2-х и 50-и метрах от животного) по трассе между дельфином и объектом поиска.

Сигналы коммуникации записывались в эксперименте с использованием провокации коммуникационного вербального поведения между тремя особями [5, 6]. В этих экспериментах сигналы эхолокации и коммуникации дельфинов точно идентифицируются, т.к. эти процессы разделены во времени и пространстве. Запись проводилась в полосе частот до 20 кГц. Регистрировались длинные последовательности сигналов (до 20 секунд) коммуникационного взаимодействия между экспериментальным дельфином и его изображением на экране подводного монитора, полученным с помощью веб-камеры [7]. Регистрация сигналов проводилась с помощью 3-х канального широкополосного автономного комплекса в частотной полосе до 600 кГц. Преобразование сигнала из аналоговой формы в цифровую проводилось с помощью 14-разрядного преобразователя E20-10 с частотой квантования 2.5 МГц [8]. Сигналы однозначно идентифицируются с рабочей особью, хорошо фильтруются от сигналов других особей и сигналов эхолокации.

Тестирование оборудования проводилось при регистрации сигналов в бассейне на дельфинах *Tursiops truncatus ponticus* и в открытой воде при регистрации сигналов рачка-щелкуна с помощью гидрофона фирмы RESON TC4014-5 (с предусилителем, расположенным непосредственно у датчика) с полосой частот до 480 кГц. В шельфовой зоне регистрация сигналов проводилась с помощью одного приемника в полосе до 600 кГц с частотой квантования до 5 МГц и двух приемников с частотой квантования 1 МГц и 5 МГц.

Временная обработка проводилась с помощью программ PowerGraph [9], Adobe Audition и самостоятельно созданного программного обеспечения, которое позволяло автоматически выделять каждый импульс из полной серии сигналов: вычислять интервал времени между импульсами; вычислять интервал времени между зондирующими и отраженным от границы сред вода-воздух импульсами; вычислять интервал времени между экстремумами для каждого импульса с использованием интерполяции; результаты вычислений можно перенести в Excel; по вычисленным данным строятся графические зависимости.

В качестве контроля правильности регистрации сверхширокополосных сигналов морских гидробионтов аппаратная часть тестировалась с помощью синтезируемых однопериодных импульсов 100 кГц и 300 кГц. Результаты тестирования приведены на рис. 1.

В качестве тестового сигнала использовались однопериодные импульсы, синтезируемые с помощью генератора RIGOL DG1022. Как видно из представленных осциллограмм для однопериодного импульса 100 кГц длительностью 10 мкс (рис.1, а) и однопериодного импульса 300 кГц длительностью 3.3 мкс (рис.1, а) максимум спектральной плотности смещается в область низких частот 86 кГц и 250 кГц соответственно (рис.1, б), а интервал между экстремумами меняется только в третьем знаке (рис. 1, в). Представленные результаты тестируют весь сквозной тракт от предусили-

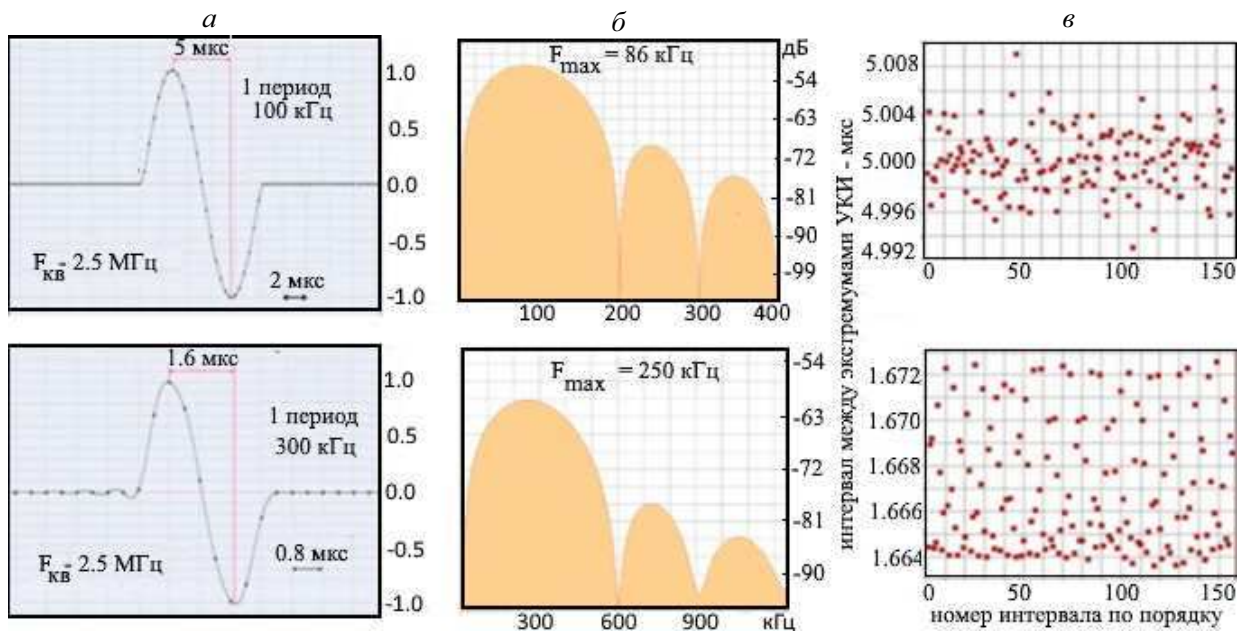


Рис. 1: Спектрально–временные параметры тестовых импульсов и разброс значений измеренных интервалов между экстремумами; а — осциллограмма однопериодного импульса 100 кГц и 300 кГц, б — спектральная плотность мощности этих импульсов, в — график изменения интервала между экстремумами в зависимости от номера импульса по порядку с использованием интерполяции

теля и включая АЦП Е20-10 при частоте квантования 2.5 МГц. Точки на осциллограммах соответствуют значениям квантования импульса.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В процессе совершенствования аппаратно-программного комплекса мониторинга гидроакустических сигналов гидробионтов появились новые факты, расширяющие наши представления о возможностях биологических систем во время излучения гидроакустических сигналов. Для китообразных излучение ультразвуковых сигналов связано с ориентацией в трехмерной среде, обнаружением и распознаванием подводных объектов, поэтому разнообразие излучаемых сигналов связано с преодолением различных естественных и антропогенных помех. Для других гидробионтов, в частности раков-щелкунов, излучаемый импульс может служить для добывания пищи с помощью мощного акустического удара.

На рис. 2 представлена осциллограмма (рис. 2, а) полной последовательности сигналов эхолокации *Tursiops truncatus ponticus* при решении задачи обнаружения на дистанции 600 м. Последовательность сигналов состоит из четырех пакетов УКИ. Интервал между импульсами в пакетах меняется от 15 мс до 45 мс. Девиация интервала прослеживается во всех пакетах, т.е. имеет место целенаправленное кодирование последовательности импульсов с время-импульсной модуляцией (ВИМ). Длительность и количество импульсов

меняется от пакета к пакету  $N_0/T(\text{мс})/N$ : где  $N_0$  — номер пакета/  $T$  — длительность пакета (мс),  $N$  — количество импульсов в пакетах: 1/510/15; 2/216/14; 3/223/12; 4/360/16. Интервал между пакетами (от 1-го импульса предыдущего пакета до 1 импульса следующего пакета) составляет 1550/1442/1356 мс, а интервал, необходимый абсолютному наблюдателю, составляет  $\sim 733$  мс. Отличие измеренного временного интервала от времени абсолютного наблюдателя является необходимой задержкой для обработки пакета УКИ, выделения кодированной последовательности на основе известной девиации скважности и времени принятия решения о последующих действиях. Измерение частотного диапазона УКИ в области высоких частот производилось при частоте квантования 3.0 МГц. Для измерения частотного диапазона в низкочастотной области частота квантования снижалась до 96 кГц. Анализ изменения динамического спектра от импульса к импульсу показал, что верхняя частота спектра УКИ не превосходит 200 кГц (рис.2, б). Нижняя частота спектра УКИ ограничена 17 кГц (рис.2, в). На динамическом спектре в области низких частот (рис.2, в), кроме шумовой дорожки, никаких дополнительных колебательных процессов от 0 до 17 кГц не присутствует.

Для сравнения на рисунке 3 представлена полная последовательность импульсов эхолокации дельфина *Tursiops truncatus ponticus* при решении задачи обнаружения подводных объектов в условиях низкочастотной антропогенной помехи до 10 кГц при дальности до цели 200 м. На осциллограмме (рис. 3, а) показана нормированная последовательность из

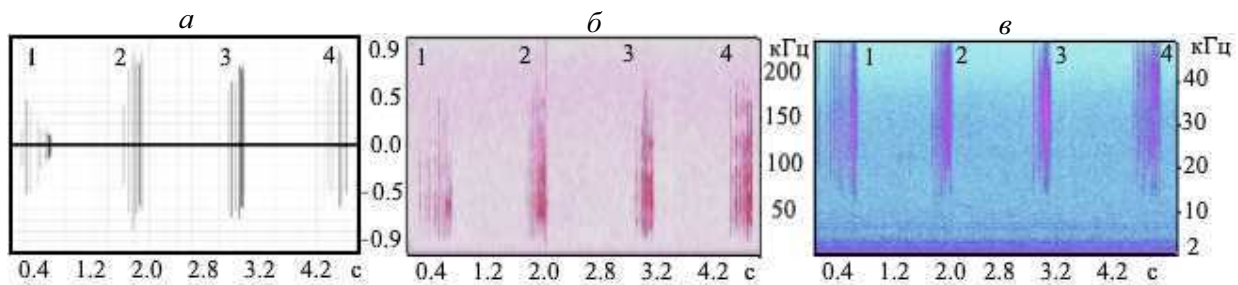


Рис. 2: Полная последовательности пакетов УКИ импульсов при решении задачи обнаружения на дистанции 600 метров: *а* — осциллограмма; *б* — динамический спектр в полосе частот до 200 кГц; *в* — динамический спектр в полосе частот до 45 кГц

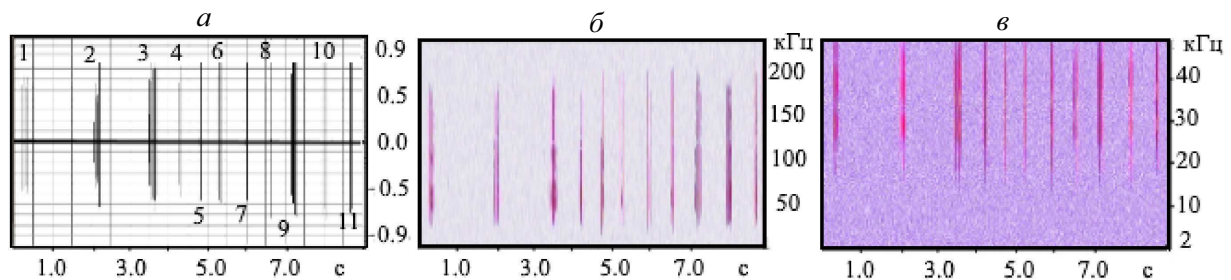


Рис. 3: Последовательность пакетов УКИ импульсов при решении задачи обнаружения в условиях низкочастотной антропогенной помехи: *а* — осциллограмма; *б* — динамический спектр в полосе частот до 200 кГц; *в* — динамический спектр в полосе частот до 45 кГц

11 пакетов УКИ. Интервал между импульсами в пакетах меняется от 17 мс до 45 мс. Девиация интервала прослеживается во всех пакетах, т.е. имеет место время-импульсная модуляция. Длительность и количество импульсов меняется от пакета к пакету: 1/135/7; 2/159/9; 3/194/8; 4/105/4; 5/60/3; 6/60/3; 7/56/3; 8/99/4; 9/151/5; 10/110/5; 11/78/4. Интервал между пакетами составляет 1846/1396/752/533/512/692/577/613/788/690/-мс, а интервал, необходимый абсолютному наблюдателю, составляет  $\sim 266$  мс. Измерение частотного диапазона УКИ в области высоких частот осуществлялось при частоте квантования 3.0 МГц. Для измерения частотного диапазона в низкочастотной области частота квантования снижалась до 96 кГц. Анализ изменения динамического спектра от импульса к импульсу показал, что верхняя частота спектра УКИ не превосходит 200 кГц (рис. 3, *б*). Нижняя частота спектра УКИ ограничена 17 кГц (рис. 3, *в*). На динамическом спектре в области низких частот от 0 до 18 кГц (рис. 3, *в*) никаких дополнительных колебательных процессов не присутствует.

Представленные спектрально-временные параметры (рис. 2, 3) измерены с помощью двух приемников, установленных в 2 и 50 м от животного. По представленным задачам обработано около 230 испытаний. Результаты анализа аналогичны представленным.

В эксперименте по исследованию эмоциональных сигналов при вербальном взаимодействии с собственным изображением на подводном мониторе самки

дельфина белухи *Delphinapterus leucas*, полученного с помощью веб-камеры, зарегистрированы акустические последовательности пакетов импульсов, осциллограммы которых представлена на рис. 4, *а*. В представленной последовательности 11 пакетов состоят из последовательности УКИ с время импульсной модуляцией ВИМ. Запись проводилась на трехканальную широкополосную систему цифровой регистрации с частотой квантования 2,5 МГц на канал. Длительность и количество импульсов меняется от пакета к пакету: 1/581/114; 2/510/100; 3/407/81; 4/342/114; 5/570/109; 6/373/114; 7/373/76; /407/40; 9/378/51; 10/320/75; 11/232/39. Интервал между импульсами в этих пакетах меняется в пределах: 4-6; 4-6; 4-6; 1,8-101; 4-5; 2,7-116; 4,7-5,2; 9-153; 7-156; 1,5-6; 2,1-41. Интервал между пакетами величина переменная и меняется от пакета к пакету следующим образом: 174, 390, 118, 658, 774, 0, 1180, 826, 40, 0. Величина интервала, равная нулю, соответствует слиянию двух пакетов.

Частотный диапазон УКИ в области высоких частот измерялся при частоте квантования 2,5 МГц, а в области низких частот — 96 кГц. Анализ изменения динамического спектра от импульса к импульсу показал, что верхняя частота спектра УКИ достигает частоты 650 кГц (рис. 4, *б*). Нижняя частота спектра УКИ ограничена 6 кГц (рис. 4, *в*). На динамическом спектре в области низких частот (рис. 4, *в*) наблюдается длинный импульс со слабовыраженной ЧМ со средней частотой 8.0 кГц. В данной последовательности отчет-

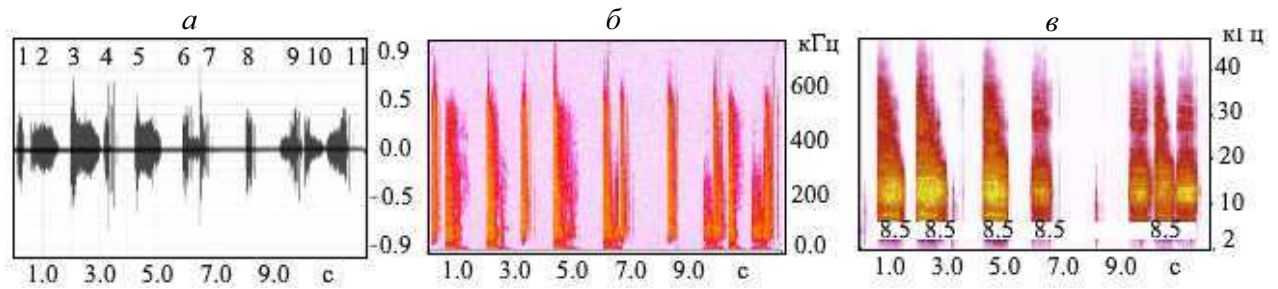


Рис. 4: Последовательность пакетов УКИ импульсов при вербальном взаимодействии с изображением на подводном мониторе: *a* — осциллограмма; *б* — динамический спектр в полосе частот до 700 кГц; *в* — динамический спектр в полосе частот до 45 кГц

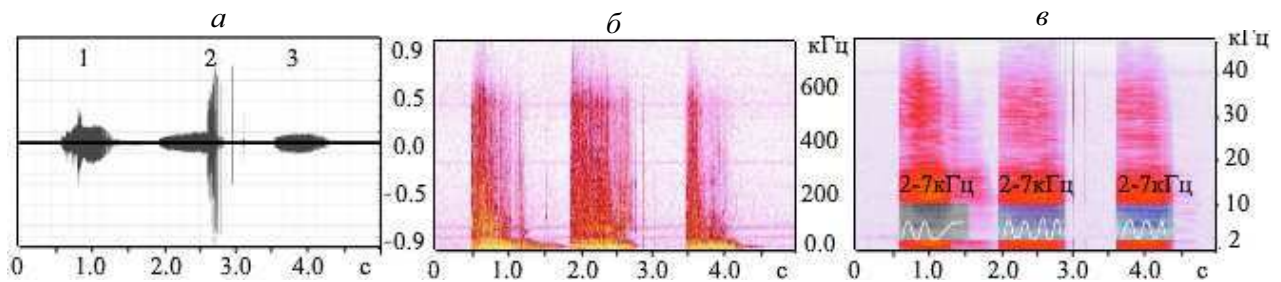


Рис. 5: Полная последовательность пакетов УКИ импульсов при вербальном взаимодействии с изображением на подводном мониторе: *a* — осциллограмма; *б* — динамический спектр в полосе частот до 700 кГц; *в* — динамический спектр в полосе частот до 45 кГц

ливо выражены составные сигналы, состоящие из пакетов УКИ с ВИМ и встроенных в пакет низкочастотного длинного импульса со слабо выраженной ЧМ.

На рис. 5 представлены результаты анализа регистрации пакетов импульсов при вербальном взаимодействии самца белухи *Delphinapterus leucas*, с собственным изображением на подводном мониторе. В представленной последовательности, которая длилась 4 секунды, зарегистрированы три пакета, состоящие из последовательности УКИ с ВИМ (осциллограмма на рис. 5, *a*). Длительность и количество импульсов меняется от пакета к пакету: 1/1096/140; 2/802/180; 3/660/80. Интервал между пакетами составляет 100 и 374 мс. Девиация скважности меняется в первом пакете в пределах  $2 \div 7$  мс, во втором пакете  $2 \div 4$  мс и в третьем  $3 \div 8$  мс.

Частотный диапазон УКИ в области высоких частот простирается до 600 кГц ( $F_{\text{кв.}} = 2.5$  МГц), а в области низких частот начинается от 10 кГц ( $F_{\text{кв.}} = 96$  кГц). Снижение частоты квантования (децимация) позволяет более наглядно исследовать низкочастотную область спектра, в которой отчетливо наблюдаются длинные импульсы с ЧМ с девиацией частоты по псевдосинусоидальному закону в области частот от 2 до 7 кГц.

Представленные спектрально-временные параметры (рис. 4, 5) измерены с помощью трех приемников, установленных в 1 и 3 метрах от животного. В этих задачах обработано 6 испытаний и результаты анализа аналогичны представленным.

Сигналы, зарегистрированные с помощью сверхширокополосной системы, показали парадоксальный результат. Ширина спектра пакетов УКИ соответствует полосе частот приемного тракта, что говорит о недостаточной частотной полосе тракта регистрации. Пакеты сигналов эхолокации регистрировались в полосе частот до 200 кГц, но максимум спектра импульсов, как правило, не превышает 140–160 кГц (рис. 2, 3). Полоса частот сигналов, регистрируемых вблизи от животного (2 м) имеет спектр значительно ниже (менее 100 кГц), чем сигналы, регистрируемые удаленным (50 м) от животного. Расширение частотного диапазона в сигналах вербальной коммуникации требует дополнительной проверки.

Для оперативной проверки комплекса регистрации с расширенным частотным диапазоном проведены дополнительные измерения в условиях бассейна на дельфинах *Tursiops truncatus ponticus* с хорошо изученным частотным диапазоном сигналов эхолокации и сигналов коммуникации (свисты). На рис. 6 представлены результаты регистрации сигналов дельфина, записанные в закрытом бассейне ( $F_{\text{кв.}} = 2.5$  МГц). Расположение гидрофона произвольное, дельфины специально не обучались на задачу обнаружения и слежения за целью или коммуникацию. Выбранный фрагмент привлекает к себе внимание большой частотой следования УКИ в пакетах. Как видно на осциллограмме (рис. 6, *a*), длительность реализации составляет 411 мс и состоит из двух пакетов длительностью 354 мс и 42 мс соответственно. Частотный диапазон некоторых импульсов

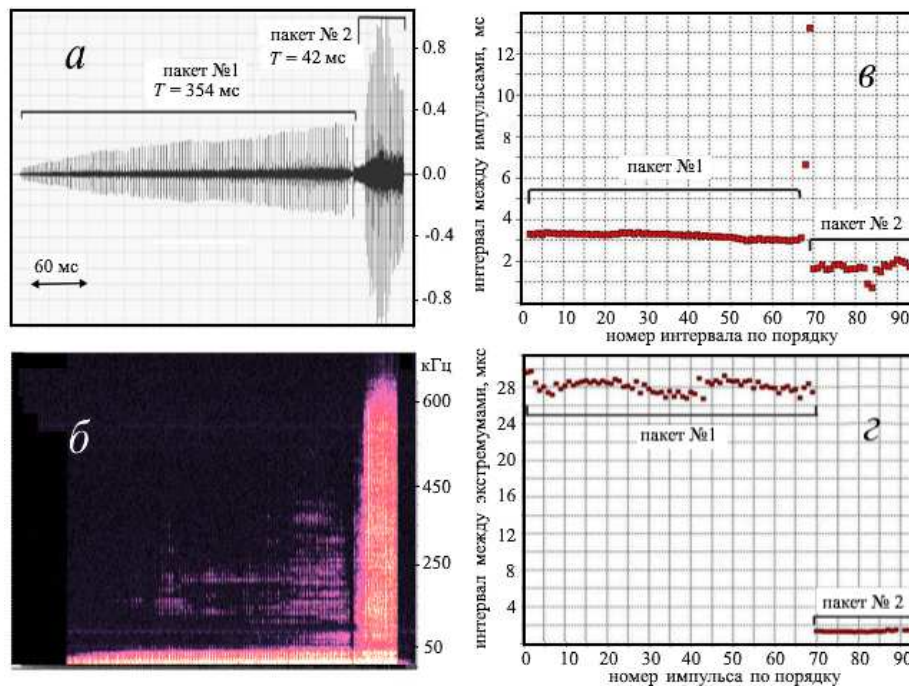


Рис. 6: Два пакета импульсов с различными временными и спектральными характеристиками: *а* — осциллограмма (амплитуда нормирована); *б* — динамический спектр; *в* — динамика изменения интервала между импульсами в зависимости от номера интервала по порядку; *г* — динамика изменения интервала между экстремумами в зависимости от номера УКИ импульса по порядку

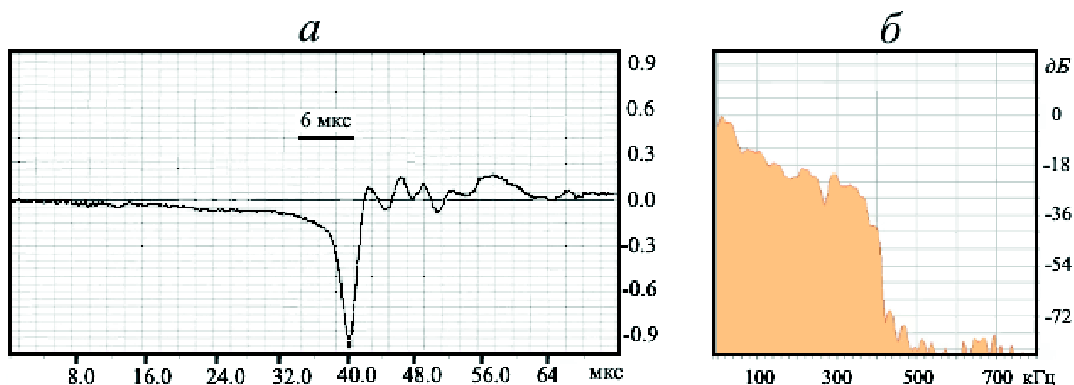


Рис. 7: Импульс, сформированный с помощью клешни рачком-щелкуном (Черное море): *а* — осциллограмма импульса; *б* — спектральная плотность мощности (окна анализа -1024)

пакета №1 не превышает 50 кГц, а пакета №2 достигает 650 кГц (рис. 6, б).

С помощью программы временного анализа измерен интервал между импульсами двух пакетов и показано, что интервал между импульсами в пакете №1 меняется в области  $3 \pm 0.2$  мс, а в пакете №2 меняется от 1 мс до 2 мс (рис. 6, в). Графическое изменение интервала между экстремумами в зависимости от номера импульса по порядку показывает, что интервал между экстремумами колебательного процесса в каждом импульсе меняется в пакете №1 от 26 до 30 мкс (рис. 6, г) и в пакете №2 от 1.8 до 2.1 мкс (рис. 6, з).

Длительная запись с помощью сверхширокополосного устройства цифровой регистрации акустических данных в шельфовой зоне Черного моря показала, что парадоксальные сигналы излучаются не только дельфинами, но и другими гидробионтами.

На осциллограмме (рис. 7, а) представлен фрагмент записи акустического импульса, издаваемого рачком щелкуном. Длительность высокочастотной компоненты определить затруднительно, но видно, что это однополярный импульс. Такие сигналы называются псевдодельта-импульсами. Основной максимум спектра дельта-подобного импульса, длительность которого

меняется от  $\sim 0.8$  мкс (вершина) до  $\sim 3.6$  мкс (основание), расположен в диапазоне до 400 кГц (рис. 7, б).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью разработанного алгоритма обработки звуковых файлов нами выделены характерные последовательности сигналов, которые однозначно связаны с условиями лабораторного опыта, что подтверждается экспериментальной работой [10]. Это позволило найти закономерности и различия в пакетах сигналов, используемых дельфином в задачах поиска и коммуникации. При моноимпульсной или мультиимпульсной работе сонара, интервал между отдельными импульсами или пакетами УКИ зависит от дальности до объекта поиска и, как правило, больше, чем время, необходимое для их анализа идеальному наблюдателю (наблюдатель работает без задержки). Количество пакетов, длительность пакетов, количество импульсов в пакетах зависит от акустических условий среды и силы цели. Длительность эхолокационных пакетов меняется от 10 мс до 600 мс, количество импульсов меняется от 2 до 20. ВИМ в пакетах меняется в диапазоне от 10 мс до 160 мс. В режиме вербального взаимодействия дельфины также используют пакеты ультракоротких импульсов с ВИМ. Пакеты коммуникационных сигналов изменяются по длительности (от 120 мс до 1100 мс) и количеству (от 25 до 100) импульсов. Интервал между пакетами меняется по длительности, и, как правило, соизмерим с длительностью излучаемых пакетов. Пакеты вербального взаимодействия, как правило, являются составными сигналами, в которых пакеты ультракоротких импульсов смешаны с длинными частотно модулированными импульсами. Частотный диапазон сигналов эхолокации ограничен 200 кГц, но граница может быть и выше. Частотный диапазон импульсов в коммуникационных пакетах (при регистрации с расширенной полосой частот) составляет 650 кГц. В коммуникационных пакетах УКИ в отличие от пакетов, используемых при эхолокации, внутри длинных пакетов УКИ, как правило, присутствует ЧМ импульс. Коммуникационные пакеты УКИ+ЧМ это сложный составной сигнал, у которого частотный диапазон импульсов достигает 650 кГц, а частотный

диапазон ЧМ импульсов не превышает 20 кГц (без гармонических составляющих).

Предполагается, что ВИМ в эхолокационных пакетах используется для кодирования собственных сигналов от сигналов других особей, ВИМ в коммуникационных сигналах является информационной составляющей инвариантной к направлению. ЧМ импульс в составном сигнале является индивидуальным опознавательным сигналом [11].

В условиях шельфа скрытую передачу гидроакустической информации с использованием биоподобных сигналов можно также создать на основе имитации коротких широкополосных (больше 100 кГц) звуков раков-щелкунов, которые к настоящему времени становятся весьма обычными не только в тропических и субтропических акваториях, но и в умеренных европейских и дальневосточных водах. Для более точного анализа необходимо повторение всех перечисленных экспериментов с регистрацией сигналов в полосе частот до 1 МГц. Развитие когнитивных исследований в условиях лабораторного эксперимента [12, 13] позволит значительно расширить наши знания по исследованию вербальной коммуникации и индивидуального сознания дельфинов.

Как показали контрольные измерения регистрирующего тракта, полоса частот шириной 200 кГц недостаточно полно отображает сигналы гидробионтов. Контрольные измерения в условиях закрытого бассейна, проведенные на дельфине афалина, показали это достаточно убедительно (рис.6). Регистрация сигналов на шельфе, принадлежащих рачку-щелкуну, также расширила наши знания о возможностях гидробионтов. Спектр сигналов при ширине тракта записи 200 кГц теряет высокочастотные составляющие, что приводит к трудностям дальнейшей трактовки результатов экспериментов.

Авторы выражают свою искреннюю признательность за предоставленную возможность проведения научных исследований: тренерскому составу, а также лично директору Санкт-Петербургского дельфинария Игорю Костову (Крестовский остров); всему тренерскому составу Анапского дельфинария, а также лично директору Людмиле Камаевой; всем сотрудникам Евпаторийского дельфинария и лично руководителям Игорю Масбергу и Руслану Павловскому.

- [1] Архипкин В.Я., Мешковский К.А. // Научно-технический журнал «Информация и космос». 2004. №3. С. 22.  
 [2] Иванов М.П. // Акустический журнал. 2004. 50, №4. С. 550.  
 [3] Рутенко А.Н., Вишняков А.А. // Акуст. журн. 2006. 52. №3. С. 375.  
 [4] Stefanov V. E, Ivanov M. P., Kashinov V. V., Stepanov B. G. Mechanisms of interference resistance of the sonar system of dolphins exposed to manmade interference //

- Symposium on Bio Sonar Systems and Bio-Acoustics, Institute Acoustics, Loughborough University, Proceedings of the Institute of Acoustics 31. Pt.1 2009, P. 22.  
 [5] Иванов М.П. // ДАН. 2008. 423, №2. С.271. DOI: 10.1134/S0012496608060002  
 [6] Иванов М.П. // Журнал эволюционной биохимии и физиологии. 2009. 45, № 6. С. 575.  
 [7] Иванов М.П., Толмачев Ю.А., Тулуб А.А., Леонова Л.Е., Романовская Е.В. // Ж. эвол. биохим. и физиол. 2018. 54. №3. С. 217.

- [8] Иванов М.П., Бутлов С.Н., Леонова Л.Е., Романовская Е.В., В.Е. Стефанов В.Е. // Акустический журнал. 2019. **65**, № 5. С. 699. DOI: 10.1134/S0320791919050101
- [9] Измайлов Д.Ю. Виртуальная измерительная лаборатория PowerGraph ПиКАД. 2007. № 3. С. 42.
- [10] Finneran, J.J. // J. Acoust. Soc. Am. 2013. **133**. P. 1796. <https://doi.org/10.1121/1.4788997> Google Scholar Scitation.
- [11] Vincent M. Janik, Laela S. Sayigh. // Journal of Comparative Physiology A. June 2013, **199**, Iss. 6. P. 479.
- [12] Herman L.M. Cognition and language competencies of bottlenoses dolphins / In: Dolphin cognition and behavior: A comparative approach, eds. R. J. Schusterman, J. A. Thomas, F. G. Wood. Lawrence Erlbaum, 1986.
- [13] Иванов М.П., Дроган Е.В. // Учен. зап. физ. фак-та Моск. Ун-та. 2014. № 5. 145351.

## Comparative evaluation of echolocation and communication signals of dolphins

M. P. Ivanov<sup>1,a</sup>, N. G. Bibikov<sup>2,b</sup>, N. A. Danilov<sup>3</sup>, P. A. Sokolov<sup>3</sup>, B. V. Romanov<sup>4</sup>, B. J. Krasnickij<sup>4</sup>, V. E. Stefanov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>St. Petersburg State University. St. Petersburg, 199034 Russia

<sup>2</sup>Joint-stock company «Acoustic Institute named after academician N. N. Andreyev»  
Moscow, 117036, Russia

<sup>3</sup>State Scientific Research Institute of applied problems. Saint-Petersburg, 191167, Russia

<sup>4</sup>Karadag Scientific Station named after T. I. Vyazemsky — The natural reserve of the Russian Academy of Sciences.  
Kurortnoye, Feodosiya, Crimea, 298188, Russia  
E-mail: <sup>a</sup>20mivanov@mail.ru, <sup>b</sup>nbibikov1@yandex.ru

Analysis of dolphin signals searching underwater objects at long distances in difficult conditions of anthropogenic interference was performed. In the experiment, it was demonstrated that dolphins similar ultrashort pulse (UPC) packets in communication behavior. Using the developed algorithm for processing sound files, we have identified characteristic sequences of signals that are uniquely related to the conditions of the laboratory experiment. This allowed us to find patterns and differences in signal packets. The interval between bursts of pulses depends on the distance to the search object and, as a rule, is longer than the time required for their analysis by an ideal observer. In the verbal interaction mode, dolphins use complex composite signals consisting of USP packets and FM pulses. Packets of communication signals vary in duration (from 120 ms to 1100 ms) and number (from 25 to 100 pulses). Simulation of cetacean signals allows you to create a set of secretive signals that will be perceived by the operator as signals belonging to animals. In the conditions of the shelf, the covert transmission of hydroacoustic information using biosimilar signals can also be created by simulating short, broadband (more than 100 kHz) sounds of cracker crayfish, which by now are becoming very common not only in tropical and subtropical waters, but also in temperate European and Far Eastern waters.

PACS: 43.80.Ka, 43.80.Lb

*Keywords:* biosimilar signals, stealth, echolocation and communication signal packets.

*Received 12 November 2019.*

### Сведения об авторах

1. Иванов Михаил Павлович — канд. биол. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: 20mivanov@mail.ru.
2. Бибииков Николай Григорьевич — доктор биол. наук, гл. науч. сотрудник; тел.: (499) 723-6311, e-mail: nbibikov1@yandex.ru.
3. Данилов Николай Анатольевич — канд. техн. наук, доцент ГУАП; e-mail: dan\_nick@mail.ru.
4. Соколов Павел Александрович — инженер-программист; e-mail: sokolviste@rambler.ru.
5. Романов Борис Валериевич — мл. науч. сотрудник; e-mail: bvromanov@gmail.com.
6. Красницкий Борис Юрьевич — вед. инженер; e-mail: krasnitzkij.b@yandex.ru.
7. Стефанов Василий Евгеньевич — канд. биол. наук, зав. кафедрой биохимии СПбГУ, доцент; e-mail: vastef@mail.ru.