

## АПРОБАЦИЯ ЛАБОРАТОРНОГО МАКЕТА РЕГИСТРАЦИИ СИГНАЛОВ ДЕЛЬФИНОВ С РАСШИРЕННОЙ ПОЛОСОЙ ЧАСТОТ СКВОЗНОГО ТРАКТА

© 2019 г. М. П. Иванов<sup>а, \*, \*\*</sup>, С. Н. Бутов<sup>а</sup>, Л. Е. Леонова<sup>а</sup>, Е. В. Романовская<sup>а</sup>, В. Е. Стефанов<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, биологический факультет,  
Университетская наб. 7/9, Санкт-Петербург, 199034 Россия

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

\*\*e-mail: m.p.ivanov@spbu.ru

Поступила в редакцию 14.11.2017 г.

После доработки 15.04.2019 г.

Принята к публикации 07.05.2019 г.

Новые технологии цифровой записи широкополосных сложных сигналов позволили разработать и создать лабораторный автономный многоканальный комплекс регистрации биоакустической активности на цифровой носитель с низким энергопотреблением и возможностью непрерывной записи до 4-х ч. Комплекс работает под управлением компьютера fit-PC с операционной системой Windows и программой цифровой записи PowerGraph в полосе частот аналогового тракта до 600 кГц. В процессе проверки комплекса получены парадоксальные сигналы зубатых китов с частотной полосой выше 200 кГц. Сигналы с расширенной частотной полосой регистрировались в условиях лабораторного эксперимента в открытой воде при решении задачи сопровождения цели и в эксперименте с провокацией акустического коммуникационного поведения.

*Ключевые слова:* эхолокационные импульсы зубатых китов, сигналы коммуникации зубатых китов, короткий биполярный широкополосный импульс, долговременная регистрация биоакустической активности

DOI: 10.1134/S0320791919050101

### ВВЕДЕНИЕ

Широкополосные системы пассивного акустического мониторинга необходимы для исследования биоакустической активности гидробионтов в различных районах Мирового океана и идентификации сигналов по видовому и внутривидовому разнообразию [1, 2]. Однако долгое время регистрация биоакустической активности была ограничена возможностями технической реализации широкополосной записи больших объемов информации.

Расширение полосы регистрации достигалось с помощью фотофиксации сигналов с экрана осциллографа или с помощью записи на специальный ультразвуковой магнитофон (полоса частот до 200 кГц) [3–5]. Обработка таких массивов данных, как с фотопленки, так и с магнитного носителя довольно обременительна.

Современные системы регистрации данных на цифровой носитель значительно расширили возможности исследований биоакустики морских млекопитающих [6]. Разрабатываемые системы акустического мониторинга зарождаются как системы двойного назначения [7] с возможностью

передачи данных по спутниковому каналу связи в режиме реального времени [8, 9].

Частотная полоса регистрирующего тракта ограничивалась частотно-пороговой кривой слуховой системы в пассивном режиме. Если допустить, что в активном режиме частотный диапазон слуховой системы меняется [10], то целесообразно исследовать частотный диапазон выше 200 кГц. Сегодня появилась возможность создать многоканальные системы непрерывного мониторинга в диапазоне частот более 200 кГц [11–13].

Для эхолокации зубатые киты используют биполярные импульсы длительностью от 10 мкс до 100 мкс с неопределенным спектральным максимумом в широком диапазоне частот от 25 до 150 кГц. Акустическое поле излучения имеет нестационарную структуру по пространству наблюдения, и параметры импульсных сигналов зависят от азимута [14]. Такие сигналы называются сверхширокополосными с неопределенной несущей или “без несущей”. В условиях лабораторного опыта показано, что при решении задачи поиска цели в сложных акустических условиях дельфины используют пакеты импульсов. В режиме

поиска цели на больших расстояниях использование пакетов импульсов показано на дельфине афалине [15] и белухи [3] в сложных условиях акустических помех [10, 15, 16], а также в сигналах коммуникации [17].

Известно, что дельфины способны излучать длинные частотно-модулированные (ЧМ) и частотно-манипулированные импульсы (ЧМн). Такие сигналы этологи называют свистами, потому что некоторые ЧМ импульсы хорошо воспринимаются на слух человеком. Известно также, что дельфины используют составные сигналы, состоящие из пакетов сверхширокополосных импульсов и ЧМ или ЧМн длинных импульсов как внутри пакета, так и за его пределами [17].

Считается, что у китообразных отсутствует необходимость излучать импульсы с шириной полосы частот более 200 кГц и длительностью менее 10 мкс. Однако имеет смысл задаться вопросом: а существуют ли сигналы с расширенной полосой частот в последовательностях импульсов эхолокации и сигналах коммуникации? Для проверки этого предположения необходимо разработать и создать автономный малогабаритный многоканальный аппаратно-программный комплекс с частотной полосой сквозного тракта не менее 600 кГц.

## ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Современная система акустического мониторинга – это многоканальный комплекс широкополосных антенн с автоматической системой записи информации на цифровой носитель [12, 20]. Антенна состоит из малогабаритных широкополосных гидрофонов (от 2-х до 49 гидрофонов). Двухканальная система цифровой регистрации биоакустической активности использовалась при записи сигналов коммуникации в условиях бассейна (биостанция им. Вяземского у подножья горы Кара-Даг) [20], а многоканальная система для изучения пространственного распределения поля использовалась при записи импульсов эхолокации [3, 5, 6, 9, 14].

Система биоакустического мониторинга состоит из аппаратной части и программного обеспечения управления комплексом. Аппаратная часть аналоговых устройств состоит из гидрофонов, предусилителей, усилителей. Аппаратная часть цифровых устройств состоит из аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и малогабаритного вычислительного устройства, способного сохранять информацию на цифровом носителе. В качестве АЦП использовался автономный модуль E20-10, в котором частота квантования программно переключается в большом диапазоне частот от 1 Гц до 10 МГц. В данном модуле можно использовать один канал с максимальной частотой квантования 10 МГц или четыре канала с мак-

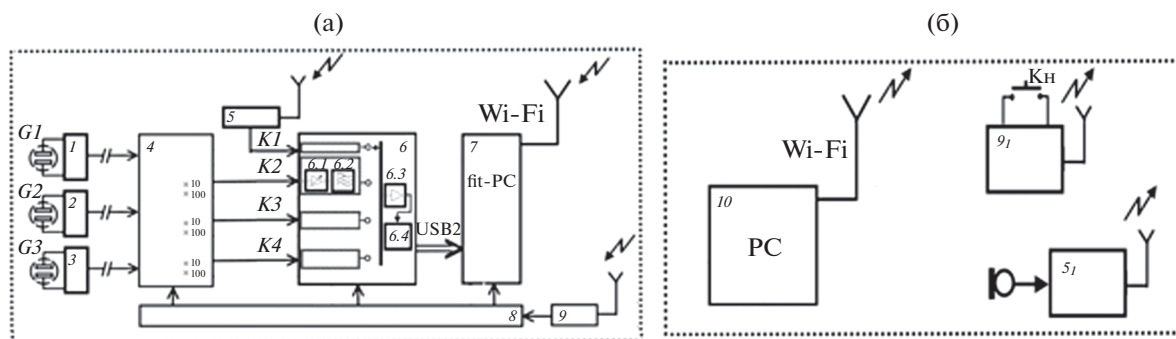
симальной частотой квантования 2.5 МГц. В модуле используется потоковый АЦП, и в каждом канале имеется фильтр нижних частот – ФНЧ 3-го порядка с частотой среза, равной частоте Найквиста (стандарт 1.25 МГц или частота среза уточняется дополнительно при приобретении) [21]. Питание модуля автономное в пределах 9–24 В.

Регистрация на цифровой носитель и управление комплексом проводились с помощью промышленного одноплатного неттопа fit-PC [22]. Основные характеристики неттопа fit-PC: процессор Intel Atom Z530 с частотой до 1.6 ГГц, оперативная память 1 ГБ DDR2, интерфейс SATA, шесть портов USB 2.0 (непосредственно на борту материнской платы), Wi-Fi 802.11g, питание 9–15 В с потреблением при низкой нагрузке 6 Вт и при полной нагрузке не более 8 Вт, а в спящем режиме 0.5 Вт; габариты 115 × 101 × 27 мм. Возможность сохранения информации на твердотельном накопителе, например на SSD 240 ГБ 2.5" SATA, позволяет значительно снизить энергопотребление и исключить возможные физические повреждения накопителя при ударных нагрузках.

Конфигурация fit-PC с шестью USB портами на борту материнской платы дает возможность организовать многопоточный сбор данных на одном компьютере, т.е. использовать одновременно регистрацию данных с шести модулей АЦП. Данная конфигурация с использованием неттопа позволяет обеспечить связь между компьютерами, а также организует удаленное управление fit-PC по радиоканалу Wi-Fi на расстоянии до 100 м, а при использовании Wi-Fi роутера расстояние между компьютерами можно значительно увеличить.

Блок-схема автономного 4-х канального комплекса представлена на рис. 1. Комплекс состоит из: 3-х датчиков акустического давления – гидрофоны (*G1–G3*, рис. 1а); 3-х предусилителей (*I–3*, рис. 1а); усилителей с 3-мя входами и 6-тью выходами. Три выхода усилителя – линейные и три выхода низкочастотные – предназначены для прослушивания среды (*4*, рис. 1а); приемник (*5*, рис. 1а) и передатчик (*5<sub>p</sub>*, рис. 1б) для одновременной регистрации речевого протокола с микрофона оператора; АЦП E20-10 (*6*, рис. 1а); компьютер неттоп (*7*, рис. 1а); блок-питания – аккумулятор (*8*, рис. 1а), приемник (*9*, рис. 1а) и передатчик (*9<sub>p</sub>*, рис. 1б) дистанционного включения/выключения блока питания комплекса; удаленный компьютер (*10*, рис. 1б) для управления комплексом. В дистанционном комплексе все устройства имеют автономное питание. Питание усилителя ±11 вольт, питание предусилителя организовано по сигнальному кабелю +8 вольт (Li-Po аккумуляторы).

Комплекс может работать автономно или под управлением дистанционного устройства, что



**Рис. 1.** (а) – Блок-схема автономного широкополосного комплекса регистрации гидроакустических сигналов и (б) – дистанционной системы управления:  $G1-G3$  – гидрофоны;  $1-3$  – предусилители;  $4$  – 3-х канальный усилитель;  $5_t, 5_r$  – передатчик и приемник записи протокола;  $6$  – модуль E20-10 ( $6.1$  – управляемый усилитель;  $6.2$  – активный фильтр низких частот;  $6.3$  – динамический коммутатор;  $6.4$  – конвейерный аналого-цифровой преобразователь);  $7$  – неттоп fit-PC;  $8$  – аккумулятор;  $9_t, 9_r$  – передатчик и приемник включения/выключения питания;  $10$  – персональный компьютер;  $K1, K2, K3, K4$  – входы модуля E20-10

позволяет вести наблюдение за процессом записи в реальном масштабе времени, при этом экран монитора fit-PC отображается на дистанционном устройстве. Выбор дистанционного устройства зависит от конкретных условий эксперимента (компьютер или планшет). В данном комплексе использовался нетбук Lenovo S10-2 с продолжительностью автономной работы до 5 часов. Протокол эксперимента передавался по радиоканалу на один из каналов АЦП или на звуковую карту fit-PC с помощью малогабаритной полнодуплексной радиостанции Alinko DJ-G7. Комплект из 3-х радиостанций позволяет одновременно фиксировать протокол от экспериментатора, оператора и инженера.

В целях уменьшения возможных помех от цифровых устройств, питание E20-10 и компьютера fit-PC организовано отдельно от многоканального усилителя, с помощью внешних аккумуляторов типа Energizer XP18000AK при общем потреблении комплексом энергии не более 20 Вт. В качестве единого корпуса использован специальный герметичный чемодан–контейнер. Комплекс имеет модульную конструкцию и позволяет оперативно заменять устройства, что создает дополнительные удобства при работе в экспедиционных условиях.

В каждом канале усилителя (4, рис. 1а) имеется входной каскад с дискретным усилением от 1 до 30 дБ с шагом 5 дБ, после которого сигнал поступает на каскад фильтра высоких частот от 0 до 3000 Гц (с шагом 500 Гц) первого порядка. Далее сигнал поступает на усилитель, с коэффициентом усиления от 1 до 4 дБ с шагом 0.5 дБ.

Стандартная длина кабеля между предусилителем и усилителем составляет 5 м. При регистрации сигналов в условиях лабораторного эксперимента нередко возникает необходимость в увеличении длины кабеля. Согласованная нагрузка

между предусилителем и усилителем дает возможность наращивать длину кабеля до 15 м.

Компьютер fit-PC работает под управлением операционной системы Windows, а система цифровой записи организована с помощью многофункциональной программы PowerGraph [23]. Ведущую роль в процессе сбора и регистрации данных играет программное обеспечение, поскольку оно определяет конечное качество, удобство и эффективность использования той или иной компьютерной измерительной системы. Программа PowerGraph поддерживает многоканальный режим регистрации на цифровой носитель, обеспечивает экспресс оценку результатов измерений по временным и спектральным характеристикам, а также позволяет оперативно проводить частотную фильтрацию и дополнительную математическую обработку данных. При непрерывной записи в течение 1 ч и частоте квантования 2.5 МГц на каждом из 4-х каналов объем занимаемой памяти на винчестере составляет ~60 ГБ.

Равномерность частотной характеристики чувствительности датчика акустического давления – гидрофона – зависит от его линейных размеров и длины звуковой волны. Уменьшение геометрических размеров гидрофона снижает неравномерность чувствительности по частоте, но и приводит к снижению средней чувствительности.

В качестве датчика акустического давления используется пьезокерамика  $\varnothing 2.5$  мм и высотой 2 мм. Датчик установлен в 50 мм от предусилителя (размеры корпуса  $\varnothing 8$  мм и длина 80 мм). Ориентировочная чувствительность гидрофона составила величину менее 3 мкВ/Па. Коэффициент усиления предусилителя не более 7. Предусилитель предназначен для согласования входного сопротивления 10 МОм и выходного сопротивления 75 Ом. Неравномерность амплитудно-частотной

характеристики сквозного тракта (предусилитель – кабель 5 м – усилитель, АЦП) не хуже  $\pm 1.5$  дБ в полосе до 600 кГц.

Акустические данные, полученные в этолого-акустических (генетически обусловленное поведение при воздействии различных факторов на сенсоры: электромагнитное – визуальное восприятие языка поз; ольфакторное – запахи при поиске партнера; тактильное – дружественный или агрессивный контакт с телом партнера; акустическое – использование сонар в качестве эхолокационной системы при поиске пищи, ориентации и коммуникации) наблюдениях, в естественных условиях обитания животных или в условиях лабораторного эксперимента систематизируются. Систематизация акустической информации выполняется с помощью базы данных, которая объединяет информацию: двигательного поведения животных, характеристики, условия эксплуатации тракта регистрации, протокол эксперимента за каждое испытание и за весь опыт.

При необходимости комплекс регистрации дополняется видеofиксацией с помощью миниатюрной видеокамеры GoPro HERO 3+, созданной специально для съемки в экстремальных условиях. Видеокамера снабжена удобным ударопрочным водонепроницаемым боксом, позволяющим проводить видеосъемку на глубине до 40 м.

## МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ

На основе АЦП E20-10, компьютера fit-PC и программного обеспечения PowerGraph создан бюджетный вариант комплекса не только для работы в закрытых бассейнах, но и для регистрации биоакустической информации в условиях открытой акватории.

Измерения в открытой воде проводились в эксперименте при сопровождении цели дельфином белухой. Положение головы дельфина под водой фиксировали с помощью пластмассового кольца на глубине от 0.5 до 1.5 м (глубина измерена по нижнему краю кольца). Объект сопровождения – уголкового отражателя со стороной 100 мм или металлическая сфера  $\varnothing 50$  мм – находился на расстоянии от 1.5 до 30 м от животного. Глубина погружения объекта менялась от 0.5 до 1.5 м. В каждом испытании объект перемещался влево, вправо или вверх, вниз, вперед, назад на расстояние не более 0.5 м от первоначального положения в течение не более 1–2 мин. Количество испытаний за один опыт не превышало 20. Весь эксперимент состоял из 26 опытов.

Процедура каждого испытания состоит в следующем:

- по сигналу экспериментатора в сектор обзор на заданном расстоянии от кольца оператор погружает объект в воду;

- по сигналу экспериментатора дельфин занимает стартовую позицию в кольце, ориентируясь в сектор поиска, и начинает излучать эхолокационные импульсы;

- оператор смещает объект в различных направлениях и по двигательному поведению головы дельфина экспериментатор убеждается в синхронном сопровождении цели;

- по сигналу экспериментатора объект поднимают над водой; дельфин выходит из кольца и нажимает на педаль ответной реакции, сообщая о своем решении – объекта в секторе поиска нет;

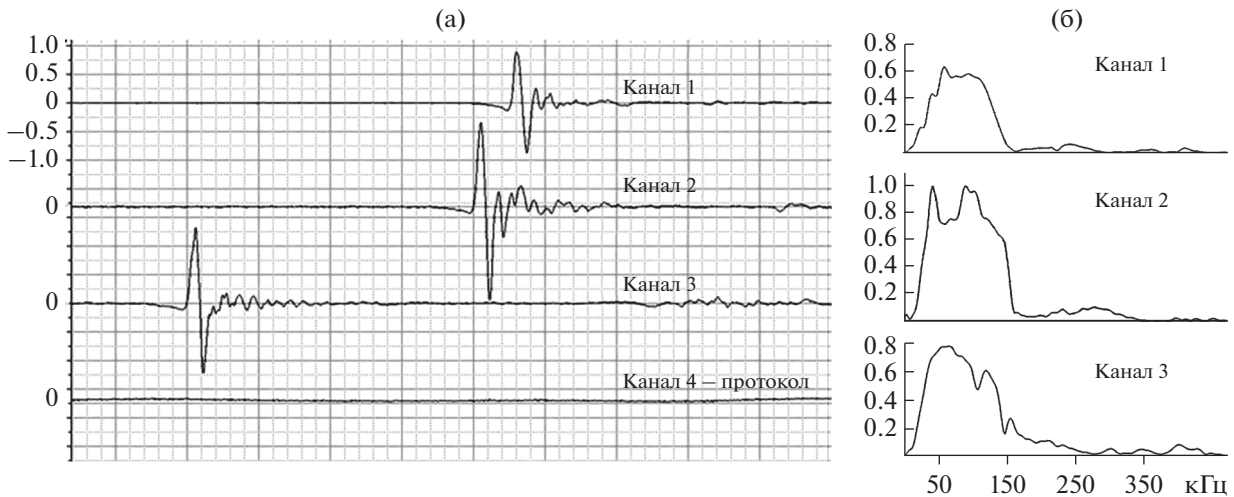
- если ответ верный, то дельфин получает пищевое подкрепление.

Аппаратура записи включена в течение всего опыта и аудиоконтроль идет постоянно. Гидрофоны устанавливались вертикально относительно друг друга или горизонтально. Расстояние между гидрофонами и дельфином менялось от 1.5 до 16 м. Такая методика разработана для записи акустической активности в ближней или в дальней зоне поля излучения. Изменение положения объекта в пространстве наблюдения создавалось специально, чтобы пятно освещенности на высоких частотах попало на центральный гидрофон.

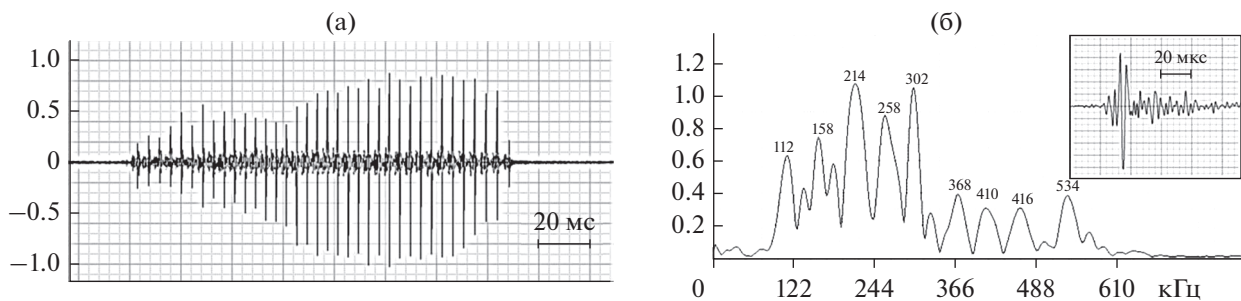
Пример 3-х канальной регистрации эхолокационного импульса дельфина белухи представлен на рис. 2а. Гидрофоны устанавливались между дельфином и объектом сопровождения и размещены по пространству измерения: центральный датчик – канал 2 в  $10 \pm 0.2$  м от животного; канал 1 расположен в 0.5 м слева от канала 2; канал 3 расположен в 0.5 м справа от канала 2. Глубина расположения нижнего края кольца и гидрофонов составляла 1.5 м. Расстояние до объекта сопровождения (сфера) составляло 20 м. На четвертом канале записывалась речь оператора в соответствии с протоколом эксперимента.

Как видно из представленной осциллограммы, все импульсы биполярные с длительностью первого колебательного процесса  $\sim 10$ – $14$  мкс с неопределенным спектральным максимумом (рис. 2б). Подобные импульсы регистрируются многими исследователями с каналом регистрации, ограниченным по частоте 200 кГц.

На рис. 3 представлен пакет коммуникационного сигнала дельфина белухи, записанный в условиях закрытого бассейна при акустическом взаимодействии животного с собственным изображением, демонстрируемым на подводном мониторе. Расстояние между дельфином и гидрофоном составляло 1.5–2 м. Учитывая малое расстояние и расширение диапазона регистрации, в коммуникационном пакете отчетливо читаются параметры импульсов в пакете и временная структура последовательности импульсов. Длительность представленного коммуникационного сигнала составляет 149 мс, он состоит из 30 им-



**Рис. 2.** Трехканальная регистрация эхолокационного импульса дельфина белухи: (а) — осциллограмма, 1 кл — 8 мкс, по оси абсцисс — текущее время; (б) — амплитудно-частотный спектр плотности трех импульсов, нормированных по амплитуде относительно канала 2.



**Рис. 3.** (а) — Осциллограмма коммуникационного сигнала белухи и (б) — нормированный амплитудно-частотный спектр одного из импульсов.

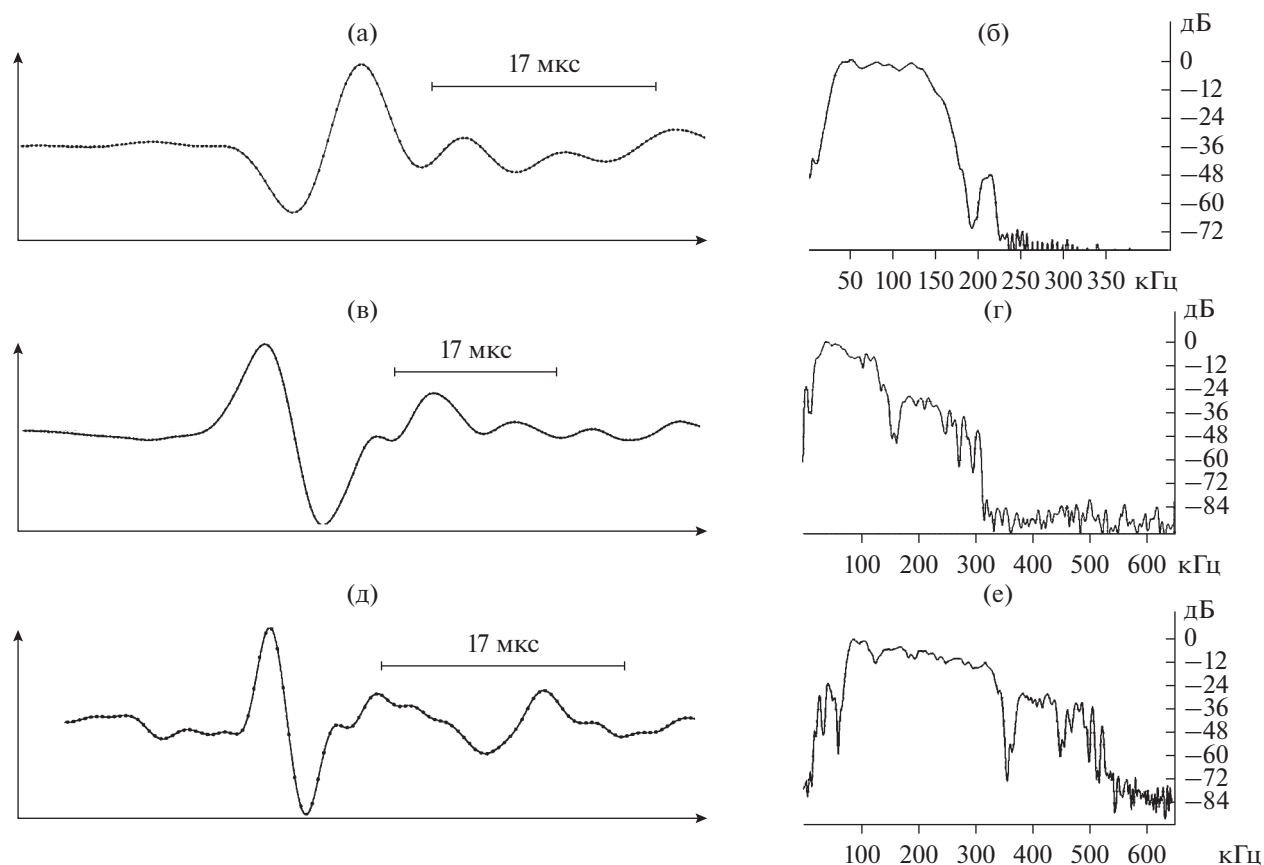
пульсов (рис. 3а) с неравномерной временной длительностью в диапазоне от 4.0 до 4.62 мс.

На рис. 4а изображена осциллограмма импульса эхолокации и его нормированная спектральная плотность (рис. 4б) афалины (*Tursiops truncatus ponticus*) при решении задачи обнаружения на дистанции 200 м в сложных условиях низкочастотных акустических помех в открытой акватории — сигналы записаны на магнитофоне МП-3 и оцифрованы при замедлении в 16 раз. Точка регистрации сигналов расположена на глубине 2 м в 50 м от животного [17]. Частотный спектр импульса ограничен полосой пропускания магнитофона МП-3 (200 кГц). Нижняя частота энергетического спектра по уровню  $-10$  дБ составляет 26 кГц, верхняя частота 152 кГц, а ширина энергетического максимума составляет 126 кГц. На данном рисунке приведены также осциллограмма (рис. 4в, 4д) и энергетический спектр (рис. 4г, 4е) сигналов эхолокации белухи

при решении задачи сопровождения цели в условиях открытой акватории.

Сигналы, записанные с использованием представленного комплекса (рис. 1), показаны на рис. 4в–4е. Как видно из рис. 4д, длительность импульса значительно короче, чем на графиках рис. 4а и 4в. Ширина основного лепестка энергетического спектра по уровню  $-10$  дБ (нижняя граница составляет 80, верхняя 320 кГц) составляет 240 кГц. Точки на осциллограмме соответствуют квантованию по времени 0.4 мкс.

На рис. 5 представлены осциллограммы и нормированный энергетический спектр импульсов из пакета сигнала коммуникации. Все импульсы регистрировали с помощью автономного комплекса в эксперименте с использованием видео и акустической обратной связи [26, 27]. Сигналы коммуникации записывали в 1–2 м от животного при глубине погружения гидрофона 0.75 м. На рисунке 5а осциллограмма импульса с шириной спектрального максимума по уровню  $-10$  дБ со-



**Рис. 4.** Эхолокационных импульсы; (а), (в), (д) — осциллограмма (интервал между отсчетами 0,4 мкс), (б), (г), (е) — нормированный энергетический спектр; (а), (б) — импульс афалины из серии последовательностей пакетов при обнаружении объекта на расстоянии 200 м (регистрация сигналов в 50 м от животного с записью на магнитофон МП-3); (в)—(г) — импульс белухи при сопровождении цели (регистрация в ~ 3 м).

ставляет 150 кГц и этот импульс очень похож на импульс, представленный на рисунке 4а. Разница между ними заключается в способе регистрации и условиях проведения измерений.

Импульс, представленный на рис. 5в, имеет 1,5 колебания, т.е. длительность большую, чем на рисунке 5а. Энергетический спектр (рис. 5в) основного лепестка по уровню  $-10$  дБ лежит в пределах от 35 до 110 кГц, а по уровню  $-60$  дБ верхняя частота 350 кГц (рис. 5г). На рис. 5д, 5е представлен парадоксальный импульс, длительность которого составляет 6 мкс (рис. 5д), а полоса частот на уровне  $-10$  дБ составляет 400 кГц (рис. 5е) и на уровне  $-36$  дБ составляет 600 кГц.

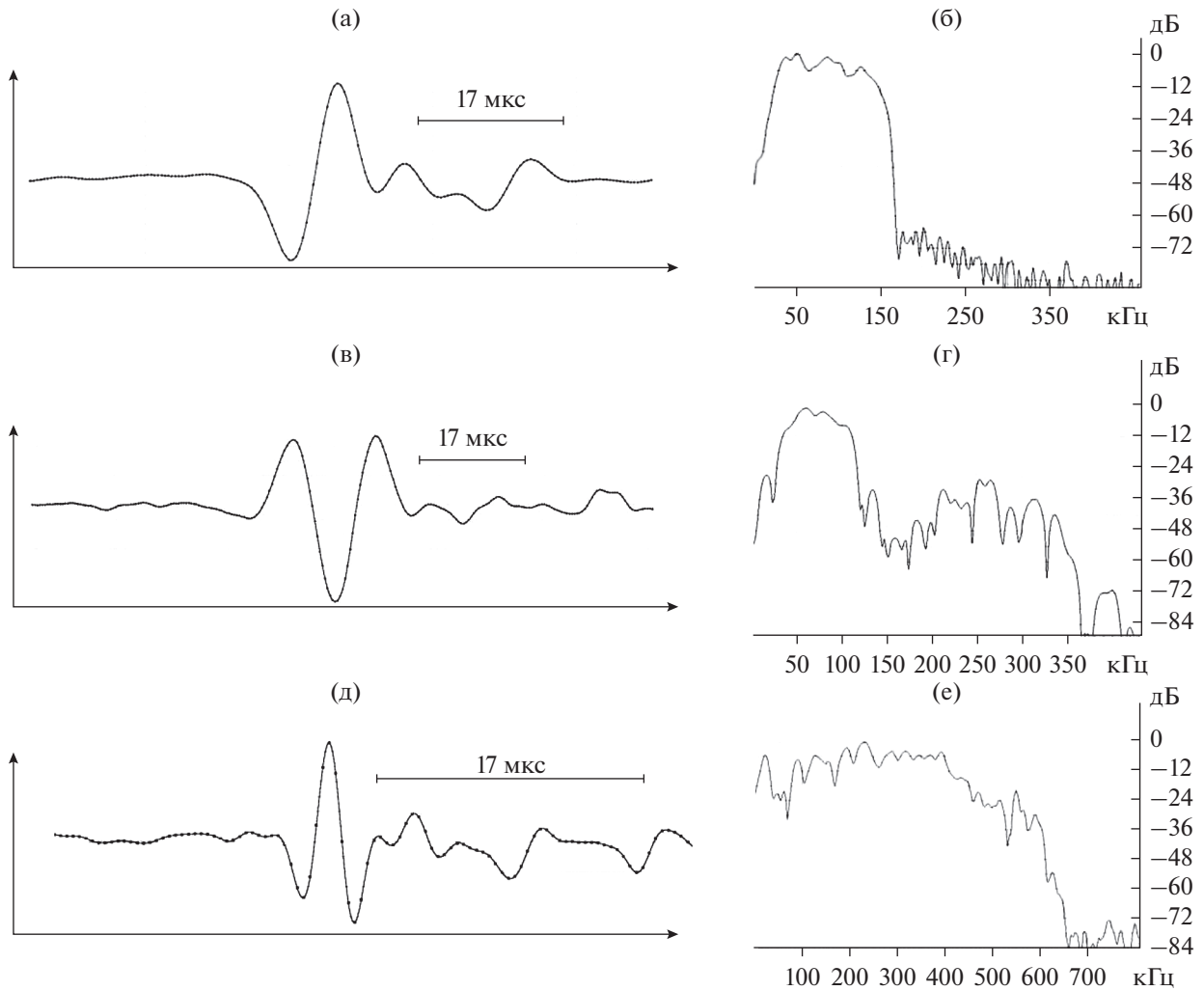
## ОБСУЖДЕНИЕ

Физические измерения в лабораторных условиях проводятся, как правило, точно выверенным по амплитудным и фазо-частотным характеристикам аппаратным комплексом и измерительным оборудованием, оснащенным системой механической юстировки, что сводит к миниму-

му различного рода технологические ошибки. Несколько труднее провести физический эксперимент в условиях открытого пространства на значительных удалениях приемника от излучателя, т. к. на результаты измерений влияют природные воздействия — ветровые нагрузки, волнение моря и неизбежная волновая качка судов или платформ, а также накопление реверберации. В конечном итоге с помощью статистической обработки и изменения физических условий регистрации можно добиться успешных результатов.

Биоакустические эксперименты от точных физических измерений отличаются тем, что характеристики сигналов и излучающего аппарата исследователю либо неизвестны, либо известны приблизительно. Предполагается, что излучаемые сигналы животных имеют частотные характеристики, согласованные с частотной характеристикой приемной системы животного. Это предположение взято на вооружение зоологами из теории сигналов. Однако, в реальных экспериментах оно, как правило, не соблюдается, т.к. биологический объект имеет запас избыточно-





**Рис. 5.** Импульсы белухи из разных пакетов коммуникационных сигналов; (а), (в), (д) – осциллограмма, (б), (г), (е) – нормированный энергетический спектр.

сти. Так, например, избыточность в слуховой системе человека обеспечивается верхней частотой до 20 кГц, хотя потенциально достаточно 5 кГц, что и используется в телефонии. Примеры расширения диапазона частот в приемном тракте есть, например, у насекомых – восковая моль, *Galleria mellonella* [28]. В уникальных измерениях на тимпанальной мембране этого насекомого с помощью лазерной доплеровской виброметрии показан колебательный процесс на частотах до 300 кГц. Если представленные результаты измерений сигналов эхолокации коммуникации верны, то возникает предположение, что у зубатых китов избыточность формируется в тракте излучения. Все измерения биоакустической активности дельфинов, проведенные в полосе частот до 200 кГц, не могли зафиксировать сигналы с полосой частот выше 200 кГц.

Этолого-акустические наблюдения китообразных в естественных условиях показывают

фантастическое разнообразие сигналов. При этом надо учитывать, что большинство зарегистрированных сигналов записаны с искажениями, т. к. запись проводится на звуковую карту компьютера ограниченной полосой 20 кГц или в лучшем случае до 50 кГц. Таким образом, этолого-акустические наблюдения дают научные данные только при исследовании ЧМ, ЧМн сигналов, а для импульсных последовательностей можно рассчитать только интервал между импульсами или пакетами и оценить длительность пакетов. Интервал между импульсами и пакетами импульсов зависит от дальности до объекта поиска, от акустического загрязнения среды [15–17], а возможно и создается для целенаправленной девиации скважности в пакетах коммуникационных сигналах.

Расшифровка назначения тех или иных сигналов раскрывается только в условиях лабораторного эксперимента с заранее известным сценарием

двигательного и акустического поведения животного. Точность регистрации зависит от дальности до объекта поиска или распознавания, реверберационного фона среды и ориентации излучения животного по отношению к гидрофону [6, 15, 20].

В представленной работе некоторые сигналы эхолокации и коммуникации дельфинов имеют спектр значительно выше, чем известные до сих пор сигналы. Если зарегистрированные импульсы с такой высокой частотой и короткой длительностью не являются артефактом комплекса регистрации, то полученные результаты представляют интерес не только для расшифровки системы излучения, но и для более подробного изучения амплитудно-частотной характеристики приемной системы. Измерение приемной системы необходимо проводить в активном режиме эхолокации, когда акустический максимум излучения и приемника совмещены, а расстояние между излучателем и дельфином переменное в диапазоне 1–16 м.

Предполагается, что в биоакустических наблюдениях сквозной тракт регистрирующего комплекса должен перекрывать диапазон частот как минимум в два раза, т. к. измерения могут оказаться разовыми, а повтор эксперимента не всегда возможен. Чтобы свести к минимуму искажения, возникающие от неравномерности пространственных характеристик приемного гидрофона, используют ненаправленный приемник размером от 2 до 10 мм. Такой приемник собирает шум и реверберацию со всех направлений, в результате в эхолого-акустических наблюдениях пакеты импульсов имеют нечеткую временную структуру. В условиях лабораторного опыта в открытой воде с точным пространственным расположением приемников и животного, временная структура пакетов читается более отчетливо. Но при условии одновременной регистрации с пространственно разнесенными гидрофонами. Многоканальная регистрация позволяет точно селектировать сигналы подопытного животного от помех или случайных сигналов находящихся рядом животных [3]. При регистрации в бассейне основная проблема биоакустических экспериментов это реверберация, которая засоряет основной сигнал так, что выделить отдельные импульсы из пакета затруднительно.

Чаще всего эхолого-акустические наблюдения морских млекопитающих на специализированных полигонах проводят зоологи. В этих исследованиях используют гидрофон диаметром ~50 мм, предусилитель, усилитель, а биоакустическую информацию ЧМ и ЧМн сигналов качественно регистрируют на традиционный ноутбук с приличной звуковой картой в полосе частот до 20 или 50 кГц [28, 29].

В последовательностях импульсов эхолокации и в пакетах коммуникационных импульсов, сиг-

налы с аномально высокой частотной характеристикой встречаются не во всех записанных массивах, но методические приемы многоканальной регистрации таких высокочастотных сигналов отработаны. Подобные сигналы пока зафиксированы при длительном непрерывном акустическом наблюдении, в некоторых экспериментальных ситуациях сопровождения цели, а также в условиях провокации коммуникационного поведения с помощью трансляции изображения на подводный монитор с веб-камеры [25, 26].

По полученным сегодня измерениям полоса частот приемного тракта ограничена 600 кГц. Запись проводилась с помощью 14-разрядного АЦП E20-10 с встроенным ФНЧ 3-порядка с частотой среза 1.25 МГц и частотой квантования 2.5 МГц на канал. В дальнейшем полосу частот приемного тракта необходимо расширить еще больше (до 1 МГц) и провести дополнительные измерения непосредственно в эксперименте по регистрации эхолокационных сигналов при сопровождении цели и сигналов коммуникации. Требуется найти верхнюю частоту спектра биоакустических сигналов и создать соответствующий ФНЧ, что позволит снизить искажения, шум тракта записи и расширить динамический диапазон, но так, чтобы ограничения на высоких частотах не искажали сверхширокополосный импульс. Не исключено, что предполагаемые адаптивные изменения в этих сигналах будут еще более выражены при регистрации сигналов с помощью сверхширокополосного комплекса.

Все процедуры, проводимые в исследованиях с участием животных, соответствовали этическим стандартам принятой практики для таких исследований.

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.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Listening in the Ocean*. Eds. Au W.W.L. and Lammers M.O. Springer, N.Y., 2016. 416 p.
2. *Munger L.M., Lammers M.O., Cifuentes M., Würsig B., Jefferson T., Hung S.* Indo-Pacific humpback dolphin occurrence north of Lantau Island, Hong Kong based on year-round passive acoustic monitoring // *J. Acoust. Soc. Am.* 2016. V. 140. P. 2754–2765.



3. Рутенко А.Н., Вишняков А.А. Временные последовательности гидроакустических сигналов, генерируемых белухой при поиске и лоцировании подводных объектов // Акуст. журн. 2006. Т. 52. № 3. С. 375–384.
4. Заславский Г.Л. Экспериментальное исследование пространственно-временной структуры эхолокационных сигналов дельфина / Дисс. ... канд. физ.-мат. наук. М.: АКИН, 1975. 140 с.
5. Безруков В.К., Гаско Р.Э., Дубровский Н.А., Заславский Г.Л. Многоканальная акустическая система для регистрации зондирующих сигналов дельфинов // Тез. докл. X Всесоюз. акуст. конф. М., 1983. С. 145–147.
6. Au W.W.L., Giori G., Chen J., Copeland A., Lammers M.O., Richlen M., Jarvis S., Morrissey R., Moretti D. Presence and seasonal variation of deep diving foraging odontocetes around Kauai, Hawaii using remote autonomous acoustic recorders // J. Acoust. Soc. Am. 2014. V. 135. P. 521–530.
7. Guan S. The use of acoustic monitoring in the National Marine Fisheries Service marine mammal incidental take authorizations // Proc. Meetings on Acoustics, 2011. Session 1pAB: Animal Bioacoustics 1pAB3. V. 11, 010002. P. 10.
8. Castellote M., Small R., Lammers M.O., Jenniges J., Mondragon J., Atkinson S. Dual instrument passive acoustic monitoring of belugas in Cook Inlet, Alaska // J. Acoust. Soc. Am. 2016. V. 139. P. 2697.
9. Hanson B., Emmons C., Ward E., Nystuen J., Lammers M.O. Assessing the coastal occurrence of endangered killer whales using autonomous passive acoustic recorders // J. Acoust. Soc. Am. 2013. V. 134. P. 3486–3495.
10. Дубровский Н.А. Эхолокационный анализатор черноморской афалины / В кн. Черноморская афалина. М.: Наука, 1997. С. 544–574.
11. Clark C.W., Ellison W.T., Southall B.L., Hatch L., Van Parijs S.M., Frankel A., Ponirakis D. Acoustic masking in marine ecosystems: intuitions, analysis, and Implication // Marine Ecology Progress Series. 2009. V. 395. P. 201–222.
12. Cheyne H., Walrod J., Gholson N., Ornee M., Clark C. Developing a portable and persistent autonomous real-time marine mammal acoustic monitor // Proc. the Oceans 2011 MTS/IEEE Conference, 2011. ISBN: 978-1-4577-1427-6.
13. Urazghildiiev I.R. and Clark C.W. Comparative analysis of localization algorithms with application to passive acoustic monitoring // J. Acoust. Soc. Am. 2013. V. 134. P. 4418.
14. Finneran J.J., Branstetter B.K., Houser D.S., Moore P.W., Mulsow J., Martin C., Perisho S. High-resolution measurement of a bottlenose dolphin's (*Tursiops truncatus*) biosonar transmission beam pattern in the horizontal plane // J. Acoust. Soc. Am. 2014. V. 136(4). P. 2025–2038.
15. 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. V. 31. Pt. 1. P. 22–28.
16. Иванов М.П. Эхолокационные сигналы дельфина при решении задач в сложных акустических условиях // Акуст. журн. 2004. Т. 50. № 4. С. 550–561.
17. Марков В.И. Организация акустической коммуникативной системы у дельфина афалины // Морские млекопитающие Голарктики. Материалы Международной конференции. Архангельск, 2000. С. 237–242.
18. Yang C., Yang W. Performance analysis of direct-sequence spread-spectrum underwater acoustic communications with low signal-to-noise-ratio input signals // J. Acoust. Soc. Am. 2008. V. 123. P. 842–855.
19. Whitlow W.A., Chong W. A Review of New Understanding of the Role of Individual Structure within the Head of Dolphins in Formation of Biosonar Signal and Beam // Oceanogr Fish Open Access J. 2017. V. 2(1). ID 555579. <https://doi.org/10.19080/OFOAJ.2017.02.555579>
20. Ryabov V.A. The study of acoustic signals and the supposed spoken language of the dolphins // St. Petersburg Polytechnical University Journal: Physics and Mathematics 2. 2016. P. 231–239.
21. L-КАРД, Россия // <http://www.lcard.ru/products/external/e20-10> (дата обращения 08.05.2019).
22. Неттоп // <http://www.fiord.com/compulab/promishlennie-pk> (дата обращения 08.05.2019).
23. PowerGraph // <http://powergraph.ru/en/soft/> (дата обращения 08.05.2019).
24. Cheyne H., Clark C. Bioacoustics Research Program. Cornell Lab of Ornithology Cornell University Ithaca NY 14850 NSF Grant Number: OCE-1138098, 2011.
25. Иванов М.П., Дроган Е.В., Никитина А.А. Исследование акустического поведения белухи (*Delphinapterus leucas*) при акустической стимуляции во время демонстрации видеообразов // Сб. науч. труд. VIII международной конференции Морские Млекопитающие Голарктики. Т. 1. Санкт-Петербург, 22–27 сентября 2014 г. С. 203–209.
26. Дроган Е.В., Иванов М.П., Никитина А.А., Ульянов А.А. Исследование двигательных поведенческих реакций белухи (*Delphinapterus leucas*) при демонстрации видеообразов с использованием обратной связи // Сб. науч. труд. VIII международной конференции Морские Млекопитающие Голарктики. Т. 1. Санкт-Петербург, 22–27 сентября 2014 г. С. 175–182.
27. Moir H.M., Jackson J.C., Windmill J.F.C. Extremely high frequency sensitivity in a “simple” ear // Biol. Lett. 9: 20130241. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2013.0241>
28. Агафонов А.В., Панова Е.М. Индивидуальный репертуар тональных (свистовых) сигналов афалины (*Tursiops truncatus*), содержащихся в дельфинарии в условиях относительной изоляции // Известия РАН. Серия биологическая. 2012. № 5. С. 509–520.
29. Беликов Р.А., Белькович В.М. Коммуникативные импульсные сигналы белух в летнем репродуктивном скоплении у острова Соловецкий в Белом море // Акуст. журн. 2008. Т. 54. № 1. С. 133–142.