УДК 599.53

© *М. П. Иванов*[1]*, *А. А. Родионов*[2], *В. Е. Стефанов*[1]

[1]Санкт-Петербургский государственный университет, 199034, Университетская наб., д. 7–9, г. Санкт-Петербург, Россия
[2]Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Нахимовский пр., д. 36, г. Москва, Россия
*E-mail: 20mivanov@mail.ru

ВОЗМОЖНОСТИ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ СИСТЕМ НАБЛЮДЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИРОДНОГО СОНАРА ЗУБАТЫХ КИТОВ

Статья поступила в редакцию 06.07.2020, после доработки 12.10.2020

Сверхширокополосные системы наблюдения еще не созданы. Однако теоретические преимущества гидроакустических систем адаптироваться к изменяющимся гидрофизическим условиям хорошо заметны при исследовании сонара морских млекопитающих. Для исследования подвижного широкополосного сонара необходимы точные биофизические эксперименты. Это делает возможным изучение подвижного широкополосного сонара, используя соответствующее техническое оснащение и методики, ограничивающие подвижность животного вовремя эхолокации. В работе приводится ряд методических решений проведения эксперимента на дельфинах, с помощью которых можно исследовать защищённость от помех и скрытность природного сонара, и впоследствии провести сравнительные испытания с техническими аналогами. На основе представленных методик будут получены сравнительные оценки сигналов эхолокации, принадлежащих различным видам морских млекопитающих. Будет сформирована база данных биологических сигналов поиска, сопровождения и распознавания подводных объектов в сложных условиях естественных и искусственных акустических помех.

Ключевые слова: сонар дельфина, сигналы эхолокации, сигналы с неопределенной несущей, пакеты ультракоротких импульсов, время импульсная модуляция пакетов ультракоротких импульсов.

© *M. P. Ivanov*[1]*, *A. A. Rodionov*[2], *V. E. Stefanov*[1]

[1]St. Petersburg State University, 199034, 7–9, Universitetskaya Emb., St. Petersburg, Russia
[2]Shirshov Institute of Oceanology RAS, 117997, Nahimovsky Pr., 36, Moscow, Russia
*E-mail: 20mivanov@mail.ru

POSSIBILITIES OF ULTRA-WIDE-BAND SURVEILLANCE SYSTEMS ON THE EXAMPLE OF THE STUDY OF NATURAL SONAR OF TOOTHED WHALES

Received 06.07.2020, in final form 12.10.2020

Ultra-wide-band observing systems have not yet been created. However, theoretical advantages of sonar systems adapting to changes of hydrophysical conditions seem to be clearly visible in the study of marine mammalian sonar. Therefore, technical equipment for a broadband recording system under long-term laboratory experience is necessary. It makes possible studying the mobile broadband sonar using accurate biophysical and appropriate techniques that limiting the animal's mobility during echolocation. The paper provides a number of methodological solutions for conducting an experiment on dolphins, which makes possible studying the noise immunity and secrecy of a natural sonar, and subsequently conduct comparative tests with technical analogues. Based on the presented methods, comparative estimates of echolocation signals belonging to various species of marine mammals will be obtained, and a database of biological signals will be formed — the search, tracking and recognition of underwater objects in difficult conditions of natural and artificial acoustic noise.

Key words: dolphin sonar, echolocation signals, signals with an undefined carrier, ultrashort pulse packets, time pulse modulation of ultrashort pulse packets.

Ссылка для цитирования: *Иванов М.П.*, *Родионов А.А.*, *Стефанов В.Е.* Возможности сверхширокополосных систем наблюдения на примере исследования природного сонара зубатых китов // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2020. Т. 13, № 4. С. 100–120. doi: 10.7868/S2073667320040097

For citation: *Ivanov M.P.*, *Rodionov A.A.*, *Stefanov V.E.* Possibilities of Ultra-Wide-Band Surveillance Systems on the Example of the Study of Natural Sonar of Toothed Whales. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2020, 13, 4, 100–120. doi: 10.7868/S2073667320040097

1. Введение

Одно из важнейших направлений совершенствования гидроакустических средств подводного наблюдения связано с изучением биологических сонаров, и, в частности, сигналов китообразных, излучаемых в различных акустических условиях. Сама природа в течение длительного времени адаптировала органы излучения и приема морских животных для решения необходимых им задач, в том числе задач подводного наблюдения. Поэтому внедрение «природных наработок» в технические средства является актуальной научно-технической проблемой.

Изучению сигналов китообразных посвящено много работ [1, 2]. Поведение и акустическая сигнализация изучались в естественных условиях обитания в Белом море [3] и в Черноморском бассейне [4]. Наблюдения проводились во время миграции и в местах нагула дельфинов *Tursiops truncatus ponticus, Delphinus delphis* [4] и *Phocoena phocoena* [5]. Натурные работы являются необходимым звеном исследований, но они имеют ряд ограничений при получении достоверной и достаточной информации для анализа и синтеза сигналов. Проведение планомерных гидроакустических измерений в условиях лабораторного содержания животных значительно расширили наши знания по изучению сонара китообразных и позволили более подробно расшифровать спектрально-временные параметры сигналов зубатых китов [6].

Обобщение результатов экспериментальных исследований показало, что все сигналы афалины и белухи можно разделить на три класса сигналов: эхолокации, навигации, социальные [7]. Сигналы эхолокации условно можно разделить на сигналы обнаружения сопровождения и распознавания цели. Их характеристики зависят от дистанции до объекта локации и помеховой обстановки. В экспериментах установлено, что дельфин излучает биполярные ультракороткие (вплоть до одного периода колебательного процесса) сверхширокополосные сигналы длительностью от 10 мкс до 20 мкс [7, 8]. Спектр сигналов китообразных афалины и белухи, как правило, лежит в пределах 200 кГц [8, 9], но последние исследования показывают, что есть сигналы, спектр которых распространяется до 600 кГц [10]. Изучение вариабельных сигналов, их идентификация, классификация и интерпретация в такой широкой полосе — задача очень сложная, т. к. требует соответствующее методическое и техническое обеспечение системы многоканальной регистрации, хранения, анализа и синтеза сигналов зубатых китов. Определенная сложность возникает при интерпретации биоакустических данных по исследованию спектрально-временных параметров сигналов дельфинов, т. к. они зависят от ракурса [11]. Многие вопросы технологического и методического обеспечения при изучении сигналов эхолокации отработаны, некоторые сигналы повторяемы и иногда хорошо интерпретируются [8, 12]. Сейчас необходимо понять арсенал адаптивных механизмов [1], обеспечивающих помехозащищенность при решении задач обнаружения в естественном акустическом фоне [12], в сложных условиях антропогенных [13] и преднамеренных помех при поиске [14] и распознавании подводных объектов [15].

Сигналы менее исследованные — это класс сигналов, используемых для ориентации в трехмерном пространстве. Этот класс включает длинные от сотен миллисекунд до 3 с сигналы с частотной модуляцией несущей. Такие сигналы очень хорошо регистрируются в условиях закрытого бассейна, но интерпретация и назначение таких длинных сигналов затруднительны из-за отсутствия необходимого методического обеспечения. При этом необходимое методическое обеспечение должно быть опробовано в различных условиях акустических помех, а результаты повторяемы.

Создание новых технологий с уверенной идентификацией двигательного и акустического поведения дельфинов при решении задач эхолокационного поиска подводных объектов в сложных акустических условиях естественных и преднамеренных помех и сегодня являются трудной задачей. Технологии обучения животных и технические реализации системы регистрации сигналов необходимы для создания базы данных сигналов различного класса не на основе статистических оценок, а на основе объективных и повторяемых спектрально-временных параметров [16].

2. Методические приемы биоакустического эксперимента в задачах обнаружения и сопровождения цели

Методические приемы включают в себя: стабилизацию положения животного, глубины погружения и ориентацию дельфина в сектор обзора во время испытания; аппаратное обеспечение, положение и расположение гидрофонов в секторе обзора, систему управления поведением животного, систему подкрепления ответных реакций. Зафиксировать животное на глубине и ориентировать в сектор обзора задача не такая легкая, т. к. практически любая система стабилизации в воде будет иметь недостатки. Поэтому этот недостаток необходимо свести к минимальной ошибке, учитывая, что направление пространственной характеристика поля излучения определяется ориентацией головы животного и конфигурацией акустической линзы по отношению к объекту поиска и регистрирующих гидрофонов.

При организации экспериментальных исследований важно понимать, что дельфин использует широкополосные сигналы, спектрально-временные характеристики которых зависят от угла наблюдения [11]. Один и тот же излученный импульс имеет нестационарную спектрально-временную структуру по отношению к наблюдателю в различных точках пространства, находящихся вне оси максимума диаграммы направленности излучения. Нестационарная структура поля излучения коротких биполярных импульсов объясняется большой разницей между размерами апертуры излучающей линзы и длины волны широкополосного сигнала. Для достоверной регистрации биоакустических сигналов используется, как правило, двухканальная система (или до 49 гидрофонов) в полосе частот сквозного тракта не более 200 кГц (полоса частот 200 кГц ограничивается частотной полосой приемной системы дельфина). Предполагается, что все происходящее за пределами 200 кГц биологическая система не учитывает. Многоканальная система регистрации позволяет более точно идентифицировать записанные сигналы с экспериментальным животным [17]. Регистрация сигналов без специальной системы фиксации животного в пространстве приводит к необоснованной трактовке результатов измерений эхолокационных сигналов, но к многообразию регистрации частотно-модулированных (ЧМ) сигналов или свистов [3, 4]. Регистрация сигналов на приемнике, расположенного вблизи животного, также приводит к неоднозначной трактовке результатов измерений [9]. Сравнение акустической активности животных при регистрации сигналов дельфинов в естественной среде обитания и в условиях содержания животных в бассейне показывает, что репертуар акустической активности в естественной среде богаче, чем в бассейне [5, 18]. Измерение излучения диких дельфинов в естественных условиях обитания показало очень стабильный результат для двух видов дельфинов в частотном диапазоне 1–200 кГц (на три гидрофона, на дальности менее 40 м) и частотой квантования 800 кГц с использованием гидрофона с полосой частот 470 кГц [18]. В этой работе наглядно показано, что чем выше частота импульсного сигнала, тем выше уровень акустического давления (*T. truncatus* 196–228 дБ/1 мкПа/м и *T. aduncus* 177–219 дБ/1 мкПа/м).

Методика эксперимента при решении задачи обнаружения подводных объектов на больших дистанциях разработана и реализована для случая статического положения животного и объекта поиска в трехмерном пространстве на основе экспериментов, проведенных в разных лабораториях [18–20]. В ходе выполненных исследований дельфин обнаруживал объекты, удаленные на расстоянии до 80 м [16]. Типичные сигналы имели длительность 40 мкс с пиком энергетического спектра в области 120÷130 кГц. Интервал задержки $T_{з.}$ составил 30 ÷ 50 мс ($T_{з.} = T_{экс.} - T_{идеал.набл.}$; где: $T_{экс.}$ — время между импульсами эхолокации в эксперименте; $T_{идеал.набл.} = 2L/C$ — время работы идеального наблюдателя (время прохождения импульса до цели и обратно); L — расстояние до цели; C — скорость звука в воде). При этом мы понимаем, что идеальный наблюдатель — это такой наблюдатель, который работает без задержки.

В задаче обнаружения подводных объектов на расстоянии до 120 м [21] максимальное время между отдельными импульсами составило 150 мс, а спектральный максимум импульсов находился в области 120 ÷ 130 кГц. Сигналы записывались в полосе до 200 кГц на гидрофон, установленный близи мишени. Эксперименты по исследованию сонара дельфина при решении задачи обнаружения показали, что дельфин успешно обнаруживает стальную сферу Ø10 см на расстоянии 120 м, а уголковый отражатель с силой цели –1.6 дБ обнаруживает на расстоянии до 600 м [18]. В этих экспериментах впервые установлено, что дельфин афалина меняет последовательность эхолокационных импульсов при увеличении дистанции до цели. При решении задачи обнаружения на малых дистанциях используется моноимпульсный режим эхолокации. При удалении объекта более 120 м — мультиимпульсный режим (излучение пакетов импульсов) [18]. При мультиимпульсной эхолокации $T_{экс.}$ — это время между первым импульсом в текущем пакете и первым импульсом в следующем пакете. Интервал времени между импульсами в пакетах во много раз меньше времени работы идеального наблюдателя. Измеряя период следования импульсов (интервал времени между импульсами в моноимпульсном режиме) или период следования пакетов импульсов в мультиимпульсном режиме, можно найти коэффициент перекрытия ($M_{перекр.} = T_{экс.}/T_{идеал.набл.}$, где при мультиимпульсной эхолокации $T_{экс.} = T_{длит.пакета.} + T_{интер.\ между\ пакетами}$), который зависит от ряда факторов. К ним относятся: акустическая обстановка (есть цель или нет цели); расстояние до цели; наличие естественной, антропогенной или преднамеренной помехи; режимы работы: обнаружение, сопровождение, распознавание цели.

Для точной идентификации сигналов дельфинов афалин была разработана и апробирована методика эксперимента, с помощью которой эхолокационная последовательность импульсов разделяется на сигналы, излучаемые при наличии объекта поиска или при его отсутствии. Методические приемы эксперимента [19] и [20] во многом сходны, но существуют и различия (установкой системы регистрации сигналов и подкреплением). Эксперимент построен по методике альтернативного выбора при последовательном предъявлении

стимулов, при этом отсутствие объекта поиска в секторе обзора также является стимулом. Управление двигательным поведением реализуется с помощью акустических команд «старт», «поиск» и сигналов «задача решена правильно», «задача решена неправильно». Пищевое подкрепление использовали только при обучении животного [20]. После получения устойчивого двигательного поведения пищевое подкрепление постепенно убирали. В результате внедрения методики акустического управления поведением без пищевого подкрепления было получено значительное увеличение количества испытаний за один опыт (до 200).

Учитывая предыдущую практику, методика модернизирована для применения ее при исследовании сонара афалины и белухи. В соответствии с методикой в ходе исследований дельфин находится в вольере, оснащенном системой передачи гидроакустических сигналов для управления поведением животного. Несущая частота сигнала — 50 кГц. Амплитудная модуляция: F1–500 Гц — команда «СТАРТ»; F2–1 кГц — команда «ПОИСК»; F3–1.5 кГц — сигнал «ОТВЕТ ПРАВИЛЬНЫЙ»; F4–2 кГц — сигнал «ОТВЕТ НЕПРАВИЛЬНЫЙ». В эксперименте использованы: манипулятор «СТАРТ» расположенный над водой в центре вольера (рис. 1); манипулятор слева от кольца — объекта поиска нет; манипулятор справа от кольца — объект поиска присутствует в секторе обзора; система фиксации дельфина в пространстве с помощью перемещаемого по глубине кольца, ориентированного в сектор обзора (во время команды «ПОИСК» дельфин вставляет голову в кольцо). За вольером в 5 м от вольера располагаются: гидрофон № 1 и в 50 м от вольера — гидрофон № 2, расположенные на глубине нижнего края кольца. Система записи сигналов расположена на плотике в секторе обзора. Помощник оператора в лодке управляет погружением мишени, радиоканалом для управления экспериментом и записью протокола на цифровой носитель.

На рис. 1 представлены основные двигательные акты поведения животного при работе в открытой воде при последовательном предъявлении стимулов.

Алгоритм работы построен следующим образом:

1) между испытаниями дельфин находится в свободном плавании (рис. 1, *а*);

2) по команде «СТАРТ» (рис. 1, *б*) дельфин поднимает голову над водой, касается рострумом центрального манипулятора и держит его до следующей команды;

3) пока дельфин держит манипулятор «СТАРТ», оператор меняет объект поиска, погружает или вынимает его из воды, меняет акустическую обстановку (рис. 1, *д*);

4) по команде «ПОИСК» дельфин погружается под воду, вставляет голову в кольцо и начинает излучать эхолокационные сигналы поиска цели (рис. 1, *в*);

5) если ответная реакция дельфина совпадает с ситуацией, то звучит акустический сигнал — «ответ правильный» (рис. 1, *г, е*);

6) если ответная реакция дельфина не совпадает с ситуацией, то звучит соответствующий сигнал — «ответ неправильный».

По данной методике проводились эксперименты по исследованию возможностей сонара дельфина афалины и белухи при решении задачи обнаружения в зависимости от расстояния до объекта поиска, при воздействии помех различного класса и в условиях распознавания подводных объектов на фоне естественных и антропогенных помех. Методика интересна прежде всего тем, что время поиска цели дельфин определяет для себя самостоятельно. Отсутствие цели также является стимулом, поэтому ответная реакция на отсутствие цели подкрепляется также, как и правильная реакция на цель, находящуюся в секторе обзора. Канал связи между экспериментатором и животными поддерживается с помощью длинных акустических импульсов с дискретной частотой несущей. Поддержка акустического канала связи позволила получить плотный контакт с животным во время эксперимента без использования пищевого вознаграждения, что мобилизовало дельфина только на работу, не отвлекаясь на выпрашивание рыбы между испытаниями.

Методика апробирована на дельфине афалина (Черное море). Система регистрации сигналов построена по двухканальной схеме с разнесением точек фиксации биоакустических сигналов в секторе обзора по трассе между дельфином и объектом поиска. Полоса частот регистрирующего тракта составляла 200 кГц, расстояние между 1 и 2-м гидрофонами (Ø 7 мм, чувствительность 7 мкВ/Па) составляло 50 м, а глубина погружения — 2 м.

Решение задачи сопровождения цели начинается с методики формирования поведенческих актов животного, которые исключают неоднозначность идентификации сигналов. Предполагается, что выбранная модель поведения должна воспроизводиться для всех лабораторных дельфинов. Хорошо воспроизводимый результат на каждом животном может быть получен только при его длительной тренировке из-за сложностей, связанных с подвижностью акустической линзы, с помощью которой дельфин способен сканировать пространственной характеристикой поля излучения в диапазоне ±10° и менять профиль излучения.

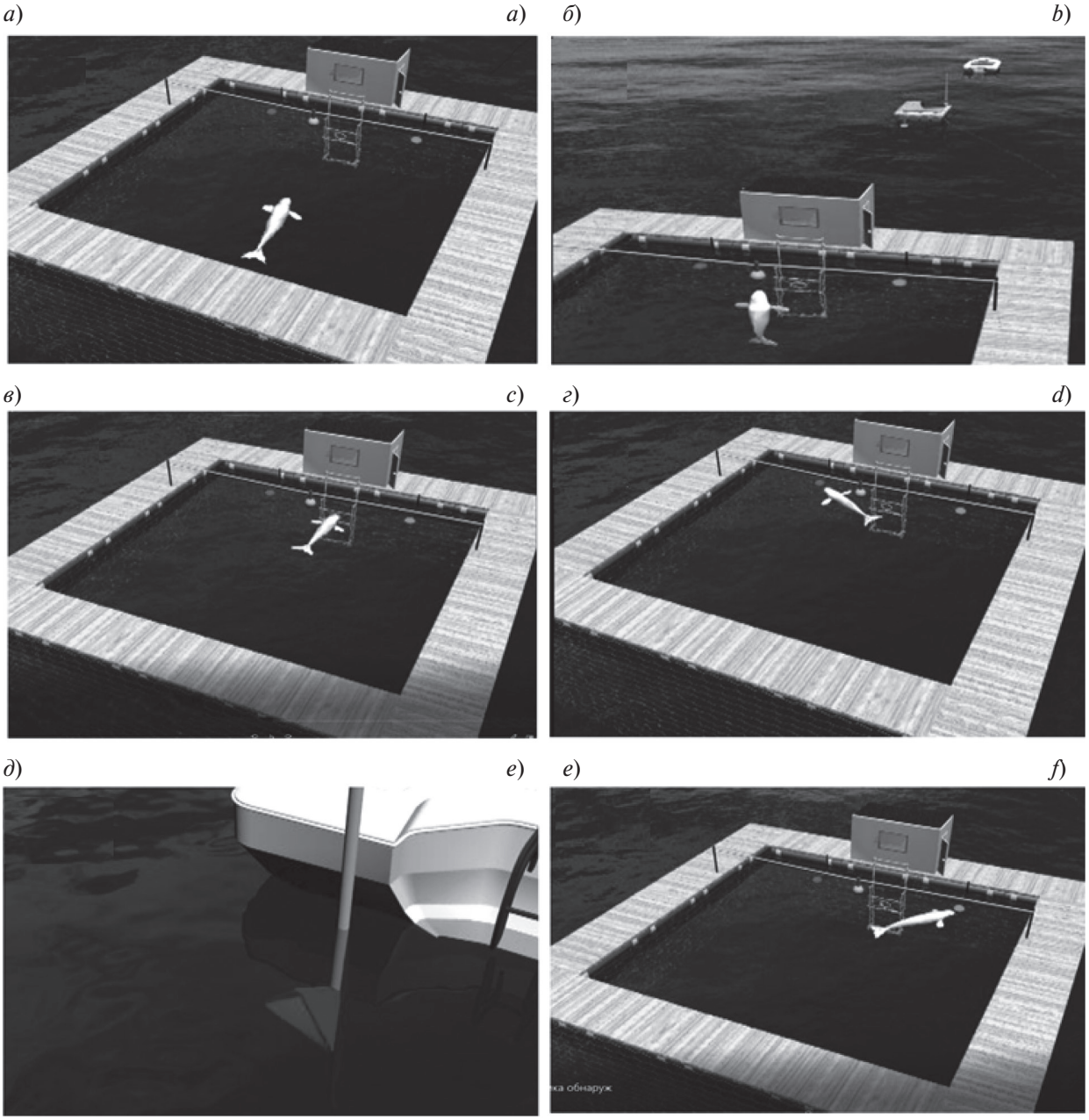

Рис. 1. Методика эксперимента с акустическим управлением двигательными актами дельфина белухи при решении задачи обнаружения подводных объектов на больших дистанциях: *а* — свободное плавание; *б* — сигнал «СТАРТ»; *в* — сигнал «ПОИСК»; *г* — мишени нет — ответ правильный; *д* — мишень в воде; *е* — мишень в воде – ответ правильный.

Fig. 1. Method of experiment with acoustic control of the Beluga Dolphin's motor acts solving the problem of detecting underwater objects at long distances: *a* — free swimming; *b* — signal «START»; *c* — signal «SEARCH»; *d* — there is no target-the answer is correct; *e* — target in the water; *f* — target in the water — the answer is correct.

На рис. 2 представлен полный цикл поведенческих актов дельфина при решении задачи сопровождения цели. Алгоритм работы дельфина построен следующим образом:

1) между испытаниями дельфин находится в свободном плавании (рис. 2, *а*);

2) по команде «СТАРТ» (рис. 2, *б*) дельфин поднимает голову над водой, касается рострумом центрального манипулятора и держит его на рострумe до следующей команды;

3) пока дельфин держит манипулятор «СТАРТ», оператор меняет объект поиска, погружает или вынимает его из воды, меняет акустическую обстановку (рис. 1, *б*); 4) по команде «ПОИСК» дельфин погружается под воду, вставляет голову в кольцо и начинает излучать эхолокационные сигналы поиска цели (рис. 1, *в*);

4) по команде «ПОИСК» дельфин погружается под воду, вставляет голову в кольцо и начинает излучать эхолокационные сигналы поиска цели (рис. 1, *в*);

5) поднимая объект над водой, оператор меняет ситуацию и, если дельфин нажимает на левый манипулятор, сообщая оператору, что мишени нет (рис. 2, *г*), то ответная правильная реакция подтверждается соответствующим акустическим сигналом.

Методика апробирована на дельфине белуха (Черное море). Система регистрации построена по трехканальной схеме с использованием сверхширокополосного тракта регистрации (до 600 кГц) с гидрофонами Ø 2 мм и частотой квантования 2.5 МГц на канал. Цифровая часть многоканальной системы регистрация построена на АЦП Е20–10 (14 р с максимумом частоты квантования 10 МГц на один канал) с программным обеспечением PowerGraph [22, 23] с фиксацией сигналов дельфина на 3 канала с поддержкой речевого протокола на четвертом канале. Гидрофоны располагались между дельфином и объектом сопровождения в середине трассы или на максимальной дальности на глубине нижнего края кольца. Пластиковое кольцо встроено в разделительную сеть на необходимой глубине. По команде экспериментатора «ПОИСК» дельфин вставляет голову в кольцо и начинает искать объект сопровождения. Гидрофоны разнесены по пространству наблюдения в вертикальной или горизонтальной плоскостях [10]. Так как эксперименты проводились в условиях циркового дельфинария, то вокруг экспериментального животного находилось до 10 дельфинов, которые внимательно следили за происходящим. С помощью многоканальной системы регистрации выделить сигналы экспериментального животного не представляло большого труда. Излучения дельфинов, находящихся с противоположной стороны трассы, происходило практически постоянно, но дельфину эти сигналы не

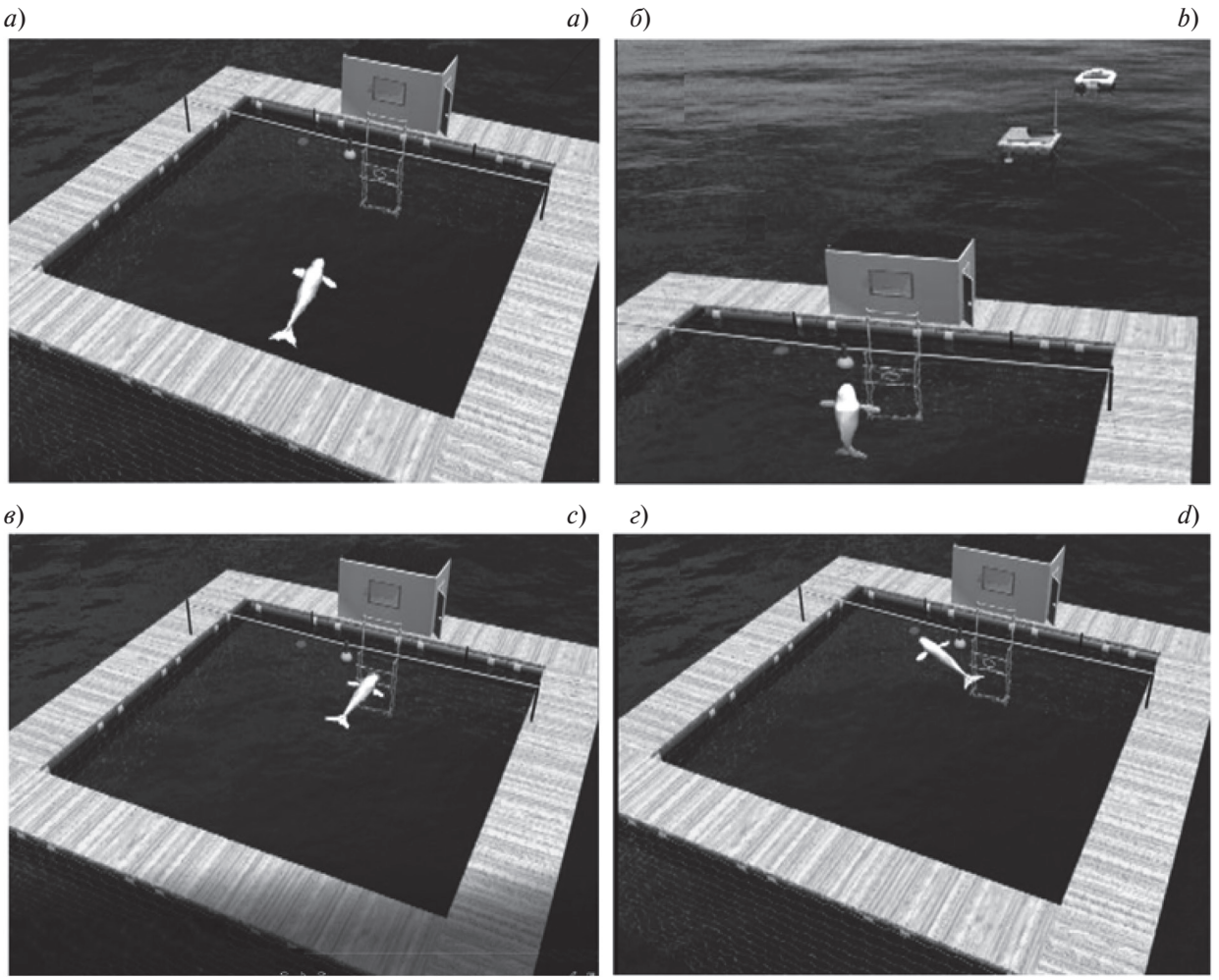

Рис. 2. Полный цикл поведенческих актов дельфина при решении задачи сопровождения цели: *а* — свободное плавание; *б* — сигнал «СТАРТ»; *в*-сигнал «ПОИСК»; *г* — мишени нет — ответ правильный.

Fig. 2. The complete cycle of behavioral acts of a Dolphin when solving the task of tracking a goal: *a* — free swimming; *b* — signal «START»; *c* — signal «SEARCH»; *d* — there is no target-the answer is correct.

мешали и потери акустического контакта с объектом сопровождения не наблюдалось. В качестве объекта сопровождения использовались сферы Ø 50 мм и уголковые отражатели со стороной 10 и 20 см. Максимальное расстояние между дельфином и объектом составляла 35 м.

Эксперименты при решении задачи обнаружения, обнаружения в условиях преднамеренной помехи, распознавания и сопровождения цели необходимо проводить в статическом режиме эхолокации, когда цель и дельфин жестко закреплены на трассе как по дальности, так и по глубине, что позволило точно с помощью многоканальной системы регистрации выделить сигналы и точно их идентифицировать с экспериментальным животным и экспериментальной ситуацией.

3. Результаты биоакустических экспериментов

На рис. 3 представлены полные последовательности импульсов по семи испытаниям, полученные на дальностях объекта поиска — 50 м, 100 м, 160 м, 250 м, 400 м, 500 м, 600 м. На представленном рисунке отчетливо видны два режима эхолокационного поиска: моноимпульсный и мультиимпульсный режимы работы сонара. В условиях естественных помех дельфин, как правило, использует моноимпульсный режим эхолокации на дистанциях до 100÷150 м. Мультиимпульсный режим или режим работы с помощью пакетов импульсов, как правило, используется при дальности до цели от 140 до 650 м, а смешанный режим — от 120 до 300 м. Количество импульсов в пакетах и длительность пакетов являются переменными величинами. Они зависят от дальности до объекта поиска, реверберационного фона среды и силы цели. Количество импульсов в одном испытании при моноимпульсной эхолокации зависит от наличия или отсутствия объекта поиска в секторе обзора и колеблется примерно от 4 до 30 импульсов. Количество пакетов в одном испытании также зависят от наличия или отсутствия объекта поиска и от успешности предыдущих испытаний.

Минимальное количество пакетов при наличии объекта поиска, как правило, 1–2, но зачастую решение задачи происходит с помощью одного пакета. При отсутствии объекта поиска в секторе обзора количество импульсов или количество пакетов увеличивается [18, 21].

Полная последовательность сигналов во время поиска подводного объекта на дальности 600 м с помощью излучения пакетов ультракоротких импульсов (УКИ) длительностью поиска, не превышающей ~5 с, и приведена на осциллограмме (рис. 4, все осциллограммы в данной работе нормированы по амплитуде).

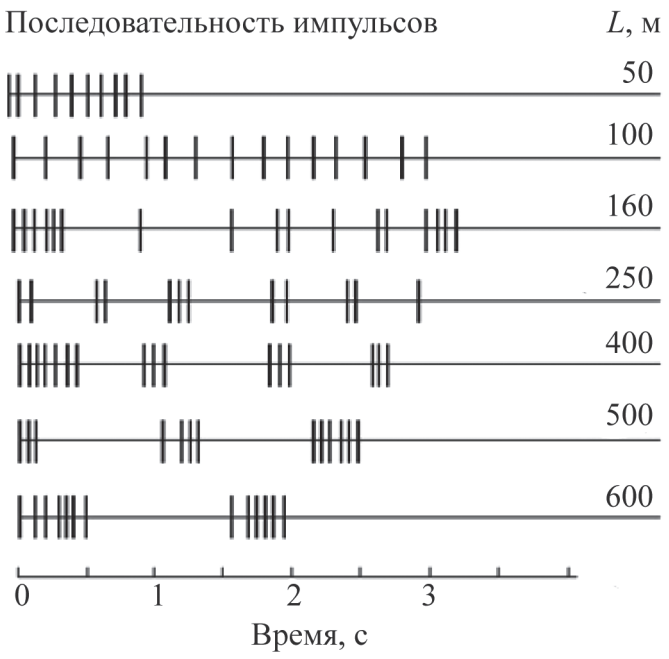

Рис. 3. Полные последовательности импульсов в семи испытаниях, полученные на различных дальностях объекта поиска; *L* — расстояние между дельфином и объектом поиска.

Fig. 3. Complete pulse sequences in seven tests, obtained at different distant ranges of the search object; *L* — the distance between the Dolphin and the search object.

При испытании сонара в статическом режиме эхолокации дельфину для обнаружения объекта потребовалось 4 пакета длительностью 516 мс, 263 мс, 226 мс и 361 мс (рис. 4, *а*). Интервал времени между пакетами составляет 1044 мс, 1235 мс, 1151 мс, что превышает время слежения идеальным наблюдателем (рис. 4, *б*). Идеальный наблюдатель — горизонтальная прямая на графике (рис. 4, *б*) соответствует времени 800 мс, т. е. обработка и принятие решения происходят мгновенно, а коэффициент перекрытия равен единице. Наблюдаемая задержка полностью доказывает, что дельфин решает поставленную задачу с помощью эхолокации (рис. 4, *а, б*) пакетами импульсов. Среднее значение коэффициента перекрытия составляет

$$M_{\text{ср.перекр.}}=1.8\pm0.1;\ (M_{\text{перекр.}}=(T_{\text{пакета}}+T_{\text{интервал между пакетом от n до n+1}})/T_{\text{идеале. набл.}}).$$

Временная зависимость последовательности УКИ показывает девиацию скважности [20, 24] или изменение время-импульсной модуляции (ВИМ) внутри пакетов (рис. 4, *в*). Использование дельфином ВИМ показывает целенаправленное управление и кодирование собственной последовательности пакетов УКИ (рис. 4, *в*).

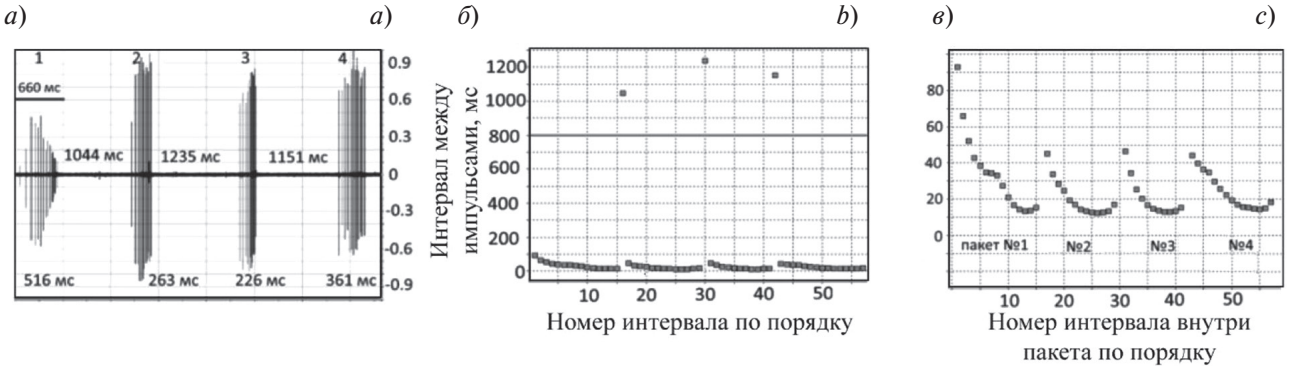

Рис. 4. Полная последовательность сигналов в одном испытании при решении задачи обнаружения при удалении объекта поиска на 600 м (мишень в воде, реакция правильная): осциллограмма длительностью ~5 с, включающая 4 пакета УКИ (*а*); (*б*) зависимость изменения интервала между импульсами от номера интервала по порядку (сплошная черта на 800 мс — интервал работы идеального наблюдателя); зависимость изменения интервала между УКИ в пакетах от номера импульса по порядку (*в*).

Fig. 4. Complete sequence of signals in one test when solving the detection problem when the search object is 600 m away (target in water, the reaction is correct): waveform with a duration of ~5 seconds, including 4 pack of ultrashort pulses (*a*); (*b*) dependence of the pulse interval from number interval order (a continuous trait in the 800 ms interval of the ideal observer); the dependence of the interval between USP in packets from the number of the pulse in order (*c*).

Анализ длительности УКИ в последовательности сигналов может быть выполнено несколькими способами, например, сравнение спектров или вычисление корреляционной функции и т. д. Учитывая, что импульсы меняются по амплитуде акустического давления, широкополосны, имеют биполярную структуру без затухания или с быстрым затуханием колебательного характера, то самым простым способом сравнения будет измерение времени между экстремумами основного биполярного колебательного процесса [25]. Графическая зависимость изменения временного интервала между экстремумами показывает динамику изменения спектрально-временных параметров импульсов в серии (рис. 5, *а*).

Изменение длительности импульса соответствует изменению в спектральной области, но при этом измеряется только один показатель. В данном испытании в первом пакете, состоящем из 15 импульсов (рис. 5, *в*) длительность между экстремумами меняется от 5 до 7.8 мкс, во втором пакете — от 4.2 мкс до 7.7 мкс, но со стабильным участком из 8 импульсов 4.35±0.05 мкс. В третьем пакете длительность меняется незначительно — 4.4±0.1 мкс, а четвертом пакете длительность изменяется от 4.3 до 4.8 мкс. Импульсы в наиболее стабильном участке во втором пакете представляют собой импульс с коротким основным колебанием и плавным затуханием колебательного процесса (рис. 5, *б*). Учитывая, что точного значения не-

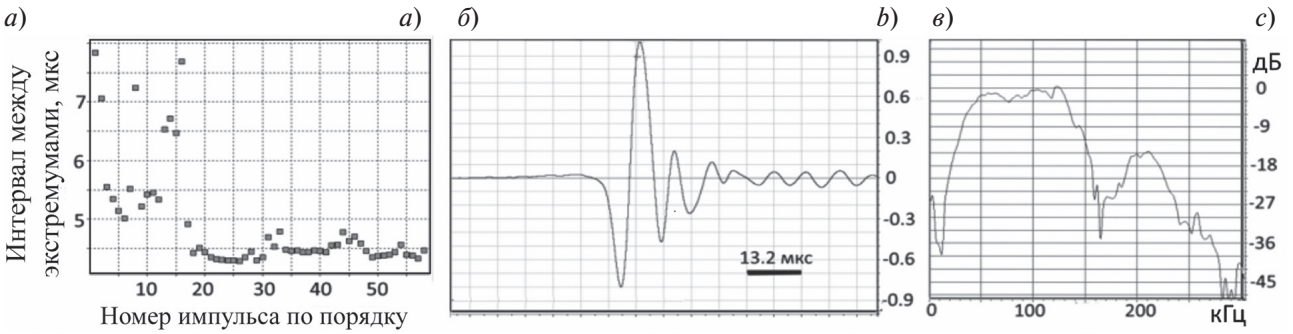

Рис. 5. Продолжение обработки результатов рис. 4: зависимость изменения интервала между экстремумами в УКИ от номера импульса по порядку (*а*); осциллограмма нормированного одного из импульсов последовательности (*б*); нормированная спектральная плотность мощности импульса (*в*).

Fig. 5. The continuation of the processing of the results figure 4: the dependence of the interval between the extrema in USP number impulse in order (*a*); the normalized waveform of one pulse sequence (*b*); the normalized spectral power density of the pulse (*c*).

сущей определить невозможно, будем исходить из того, что измерение длительности между экстремумами будет соответствовать условной несущей. Для примера, при длительности импульса 4.3*2 = 8.6 мкс, частота условной несущей будет соответствовать 116 кГц, а для сигнала длительностью 7.8*2 = 15.6 мкс частота условной несущей соответствует 64 кГц, т. е. имеет место отсутствие привычного резонанса несущего колебания или иначе сигнал с неопределенным максимумом спектра мощности или сигнал без несущей. Импульс длительностью между экстремумами 4.3 мкс в четвертом пакете (рис. 5, *б*) имеет условную несущую 116 кГц (рис. 5, *а*). Ширина полосы по уровню –3 дБ составляет 80 кГц в области частот от 50 кГц до 130 кГц и по уровню –10 дБ составляет ширину 117 кГц в области частот от 29 кГц до 146 кГц. Хотелось бы напомнить, что для таких коротких импульсов преобразование Фурье будет показывать меньшее значение максимума несущей, чем вычисленное с помощью точного измерения интервала между экстремумами, что обусловлено низкочастотной огибающей.

На осциллограмме (рис. 6, *а*) представлена полная последовательность сигналов в одном испытании при решении задачи обнаружения и удалении объекта поиска на 450 м в ситуации отсутствия объекта поиска и неправильной ответной реакции дельфина. На осциллограмме можно видеть импульсы животного, не участвующего в эксперименте, которые значительно меньше по амплитуде относительно основных сигналов. Длительность процесса поиска составляет ~4 с. Дельфин в процессе поиска использует 5 пакетов УКИ со значительной задержкой (до ~400 мс) относительно работы идеального наблюдателя (600 мс), что связано с условием испытания, т. е. отсутствием объекта поиска и «сомнения» в процессе принятия решения (рис. 6, *б*). Среднее значение коэффициента перекрытия составляет $M_{\text{ср. перекр.}} = 1.7 \pm 0.2$. Пакеты импульсов состоят из УКИ с ВИМ с ярко выраженным изменением закона модуляции от пакета к пакету (рис. 6, *в*).

Интервал между экстремумами в этой последовательности меняется от 4.15 до 5.1 мкс при среднем значении 4.4 мкс (рис. 7, *а*). Первый импульс, достаточно близкий по форме к биполярному импульсу (рис. 7, *б*) имеет длительность между экстремумами 5.1 мкс (рис. 7, *а*) и условной несущей 98 кГц. Ширина полосы по уровню –3 дБ (рис. 7, *в*) составила 55 кГц (45–100 кГц), а на уровне –10 дБ составила 123 кГц (20–143 кГц). Для 22-го импульса длительность между экстремумами составляет 4.15 мкс (рис. 7, *а*) с условной несущей 120 кГц. Импульс имеет ярко выраженное колебание первого периода и в дальнейшем плавным затуханием колебательного характера (рис. 8, *а*). Ширина полосы на уровне –3дБ (рис. 8, *б*) составила 32 кГц (97–129 кГц), а на уровне –10 дБ составила 141 кГц (32–173 кГц). 30-й импульс представлен на осциллограмме (рис. 8, *в*) с длительностью между экстремумами 4.6 мкс (рис. 7, *а*) и условной несущей 108 кГц. Ширина полосы на уровне –3 дБ (рис. 8, *г*) составила 28 кГц (100–128 кГц) и на уровне –10 дБ составила 129 кГц (от 29 кГц и 158 кГц).

Спектрально-временные параметры эхолокационных импульсов при обнаружении на больших расстояниях (рис. 5 и 8) совпадают с представленными данными в работе [24].

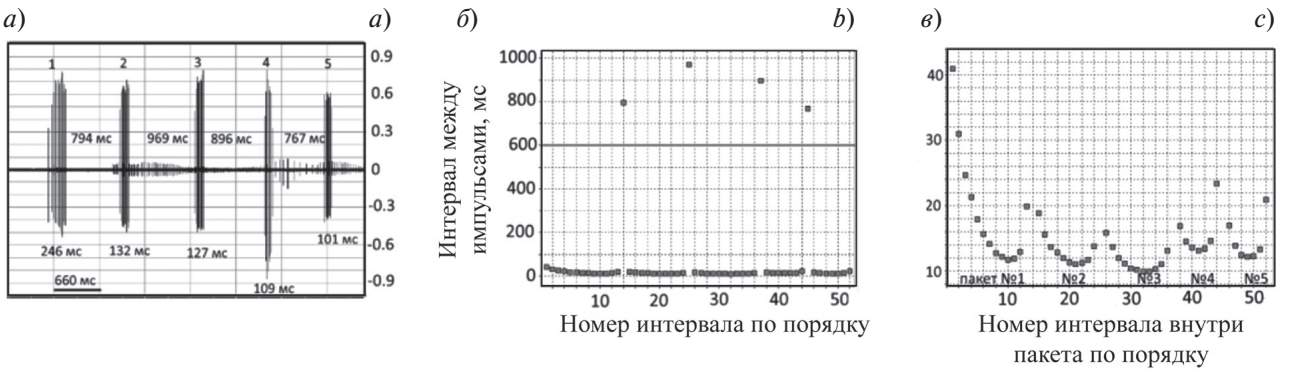

Рис. 6. Полная последовательность сигналов в одном испытании — решение задачи обнаружения при удалении объекта поиска на 450 м (мишени нет, реакция неправильная): осциллограмма длительностью ~4 с, состоит из 5 пакетов УКИ (*а*); зависимость интервала между импульсами от номера интервала по порядку (*б*); зависимость изменения интервала между УКИ от номера импульса по порядку (*в*).

Fig. 6. Complete sequence of signals in one test when solving the problem of detecting and removing the search object at 450 m (there is no target in the water, the reaction is incorrect): waveform with a duration of ~4 seconds, consists of 5 packs USP (*a*); the dependence of the pulse interval from number interval in order (*b*); dependence of change of the interval between the USP from the number of the pulse in order (*c*).

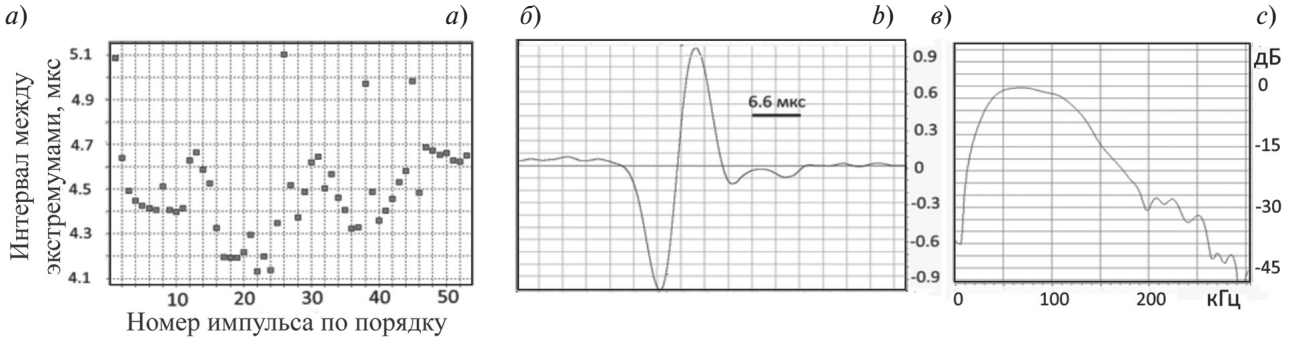

Рис. 7. Продолжение обработки результатов рис. 6: зависимость изменения интервала между экстремумами в УКИ от номера импульса по порядку (*а*); осциллограмма 1-го импульса последовательности (*б*); нормированная спектральная плотность мощности импульса (*в*).

Fig. 7. Processing results figure 6: the dependence of the interval between the extrema in USP number impulse in order (*a*); oscillogram of the 1st pulse sequence (*b*); the normalized spectral power density of the pulse (*c*)

Осциллограмма полной последовательности сигналов в одном испытании при решении задачи обнаружения на дистанции 200 м при воздействии преднамеренной помехи в полосе частот до 50 кГц в ситуации «мишень в воде, реакция неправильная (пропуск цели)» представлена на рис. 9, *а* [14]. Длительность последовательности импульсов составляет ~6 с, которая состоит из 6 пакетов импульсов длительностью от 117 мс до 234 мс. Интервал между пакетами лежит в диапазоне 302–445 мс, что больше, чем время необходимое идеальному наблюдателю (266.6 мс), т. е. пакеты излучаются с задержкой, необходимой для обработки и принятия решения (рис. 9, *б*). Среднее значение коэффициента перекрытия составляет $M_{\text{ср.перекр.}} = 1.8 \pm 0.3$. Сравнивая полученные значения временного интервала между импульсами в пакетах при работе в сложных условиях изменения дальности до объекта поиска или воздействия акустических помех, можно сделать вывод о том, что дельфин и в этом случае кодирует последовательность эхолокационных импульсов [25, 26] с использованием ВИМ. Интервал между экстремумами в данном испытании меняется от 5.1 мкс до 8.4 мкс (рис. 10, *а*), что соответствует изменению условной несущей от 100 кГц до 59.5 кГц. Для дальнейших измерений выделен 7-й импульс с длительностью между экстремумами 5.3 мкс (рис. 10, *а, б*) и условной несущей 94 кГц. Ширина максимума спектральной плотности мощности по уровню –3 дБ равна 106 кГц и меняется в пределах 23–129 кГц и по уровню –10 дБ ширина спектра составляет 108 кГц в пределах 23–131 кГц.

Публикации по экспериментам при решении задачи обнаружения в сложных условиях акустических помех, к сожалению, очень скудны. Первые работы по исследованию влияния акустической помехи на работу сонара дельфина проводились в закрытом бассейне и пакетов излучения импульсов никто не наблюдал. Получена зависимость частоты следования эхолокационных сигналов от сложности эхолокационной задачи [27], которая показывает, что чем сложнее акустический фон среды, тем больше интервал времени между импульсами. Эксперименты, проведенные в открытой воде в режиме моноимпульсной эхолокации в работе [28] показали аналогичный результат. В Работе Романенко Е.В. [29] впервые показаны феноменологические результаты изменения спектральных характеристик излучаемых импульсов в ответ на шумовое воздействие. Антропогенное шумовое воздействия (различных плавсредств и гидролокаторов) на акустическое поведение в открытой воде диких животных изучалось достаточно подробно [30–32] при изучении интенсивного воздействия судоходства во время фокусного слежения за 14 животными. В работе приводится анализ частоты излучения ЧМ сигналов и изменение закона модуляции несущей, в зависимости от плотности судоходства. Самое подробное исследование по акустическому воздействию и адаптация сонара дельфина на это воздействие представлено в работах [14, 20, 33]. Изменение стратегии акустического поведения с уменьшением соотношения сигнал помеха описано в работе [34].

При решении задачи распознавания цели на малых расстояниях дельфин использует моноимпульсный режим эхолокации, состоящей из 11-ти УКИ (рис. 11, *а*). Длительность последовательности импульсов составляет ~1.8 с и вариацией интервала между импульсами от 114 мс до 288 мс и задержкой относительно идеального наблюдателя от 34 мс до 208 мс (рис. 11, *б*). Предполагается, что такая большая задержка обусловлена необходимостью значительно больших временных затрат для решения задачи распознавания и принятия решения, чем решение задачи обнаружения [15, 35]. Среднее значение коэффициента перекрытия составляет $M_{\text{ср.перекр.}} = 2.3 \pm 1.2$.

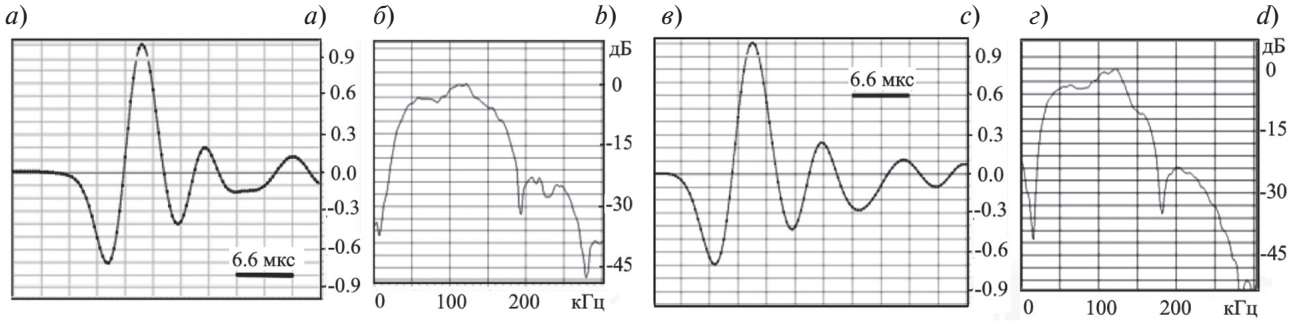

Рис. 8. Продолжение обработки результатов рисунка 5: осциллограмма 22-го импульса (*а*) и его нормированный спектр мощности (*б*); осциллограмма 30-го импульса (*в*) и его нормированный спектр мощности (*г*).

Fig. 8. Continuation of processing the results of figure 5: the oscillogram of the 22nd pulse (*a*) and its normalized power spectrum (*b*); the oscillogram of the 30th pulse (*c*) and its normalized power spectrum (*d*).

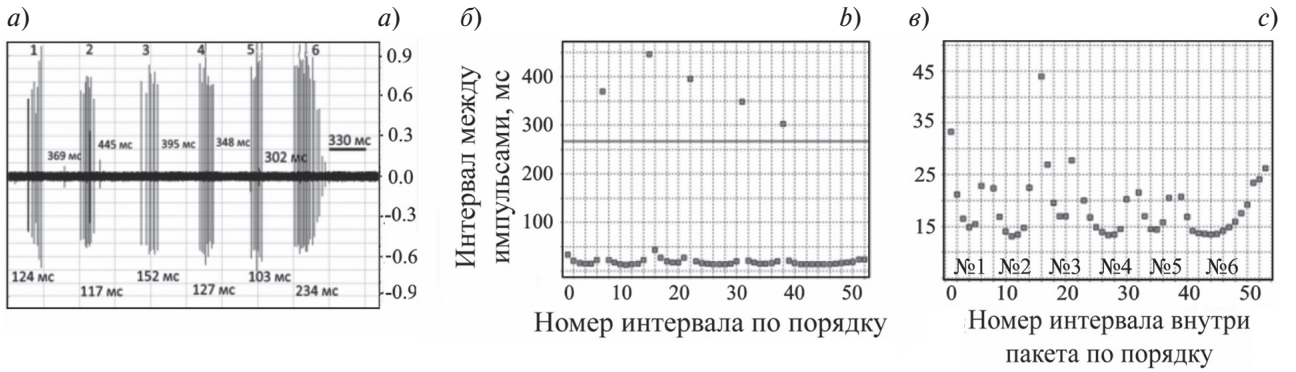

Рис. 9. Полная последовательность сигналов в одном испытании при решении задачи обнаружения при воздействии преднамеренной акустической помехи в полосе до 50 кГц (мишень в воде, реакция неправильная — пропуск цели): осциллограмма длительностью ~6 с, состоящей из 5 пакетов УКИ (*а*); зависимость интервала между импульсами от номера интервала по порядку (*б*); зависимость интервала между УКИ в пакетах от номера импульса по порядку (*в*).

Fig. 9. Complete sequence of signals in one test solving the detection problem when exposed to deliberate acoustic interference in the band up to 50 kHz (target in water, incorrect reaction — missing the target): an oscillogram with a duration of ~ 6 seconds, consisting of 5 USP packets (*a*); the dependence of the interval between pulses on the number of the interval in order (*b*); the dependence of the interval between the USP in packets on the number of the pulse in order(*c*).

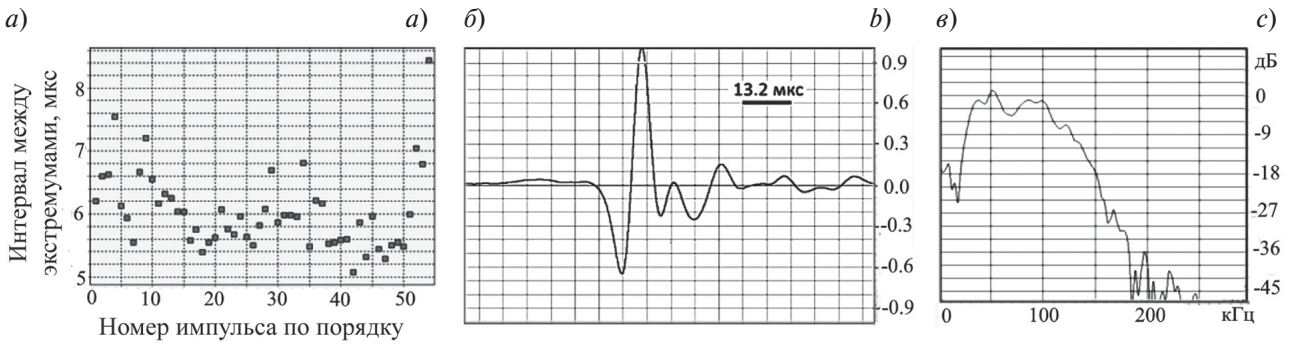

Рис. 10. Продолжение обработки результатов рисунка 9: зависимость изменения интервала между экстремумами в УКИ от номера импульса по порядку (*а*); осциллограмма 7-го импульса (*б*) и его нормированная спектральная плотность мощности (*в*).

Fig. 10. Continuation of processing of the results of figure 9: the dependence of the change in the interval between extrema in the USP on the pulse number in order (*a*); the oscillogram of the 7th pulse (*b*) and its normalized power spectral density (*c*).

В данной последовательности длительность между экстремумами меняется от 5.16 мкс (7-й импульс, рис. 11, *в*) до 10.7 мкс (11-й импульс, рис. 11, *в*) или в частотной области условная несущая варьирует от 47 кГц до 97 кГц. 7-й импульс представлен на осциллограмме (рис. 12, *а*), с длительностью между экстремумами 5.16 мкс (рис. 11, *в*) и условной несущей 97 кГц. Спектральная плотность мощности (рис. 12, *б*) имеет максимум на частоте 70 кГц и шириной по уровню –3 дБ 91 кГц в диапазоне от 32 кГц до 123 кГц, а по уровню –10 дБ ширина спектра составляет 114 кГц в диапазоне от 23 кГц до 137 кГц. Импульс номер 11 представлен на осциллограмме (рис. 12, *в*) длительностью между экстремумами 10.7 мкс (рис. 11, *в*) и условной несущей 47 кГц, в котором ширина спектра по уровню –3 дБ составляет 19 кГц в диапазоне от 32–51 кГц с максимумом на частоте 41 кГц, а ширина по уровню –10 дБ составляет 44 кГц в диапазоне от 23 кГц до 67 кГц.

Полная последовательность импульсов за одно испытание при решении задачи обнаружение объекта на дистанции 2 м в течение ~107 мс состоит из 6 УКИ (рис. 13, *а*). Интервал между импульсами в среднем составляет ~21.3±0.8 мс, в то время как временной интервал для идеального наблюдателя составляет 2.66 мс (рис. 13, *б*). Задержка составляет ~18 мс, что, по-видимому, обусловлено минимальным временем анализа акустического образа слуховой системы дельфина. Среднее значение коэффициента перекрытия составляет $M_{\text{ср.перекр.}}$=7.9±0.2.

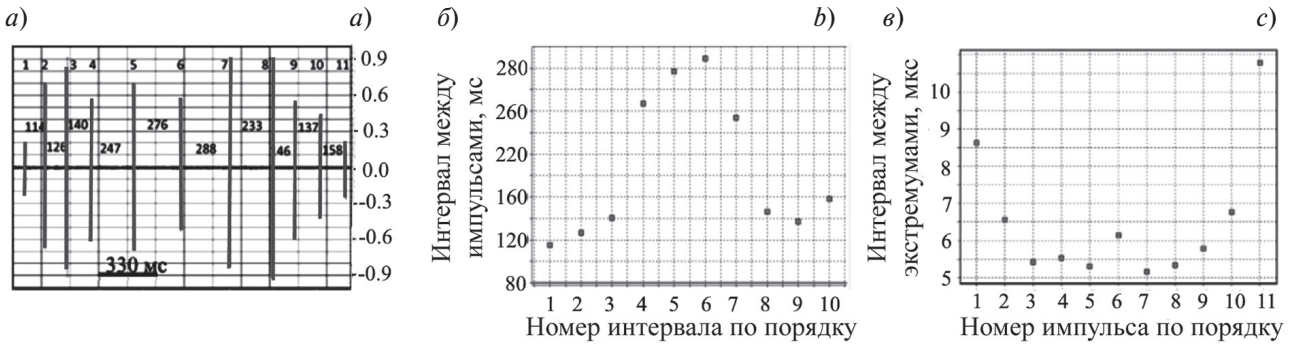

Рис. 11. Полная последовательность сигналов в одном испытании при решении задачи распознавания подводных объектов на дистанции 60 м: осциллограмма длительностью ~1.8 с, состоящей из 11-ти УКИ (*а*); зависимость интервала между импульсами от номера интервала по порядку (*б*) зависимость изменения интервала между экстремумами УКИ от номера импульса по порядку(*в*).

Fig. 11. Complete sequence of signals in one test solving the problem of recognizing underwater objects at a distance of 60 m: an oscillogram lasting ~1.8 seconds, consisting of 11 USP (*a*); the dependence of the interval between pulses on the number of the interval in order (*b*) the dependence of the change in the interval between the extrema of the USP on the number of the pulse in order (*c*).

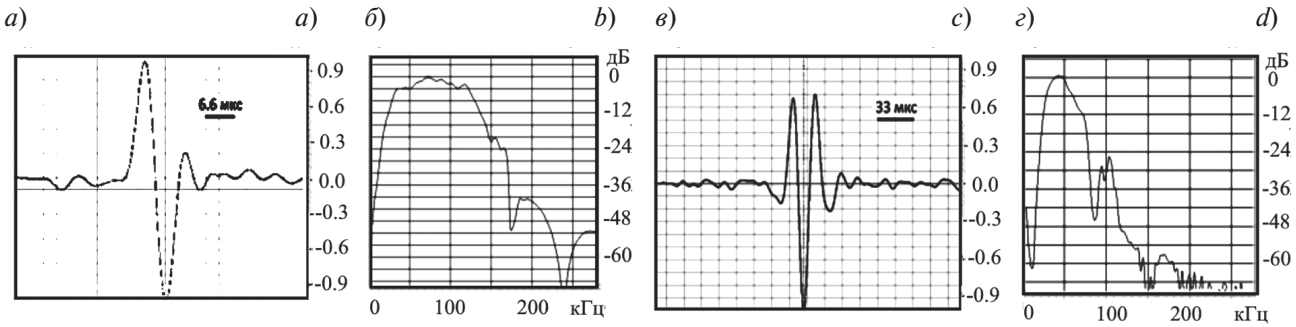

Рис. 12. Продолжение обработки последовательности (рис. 11): осциллограмма 7-го импульса последовательности (*а*); нормированная спектральная плотность мощности 7-го импульса (*б*); осциллограмма 11-го импульса последовательности (*в*); нормированная спектральная плотность мощности 11-го импульса (*г*).

Fig. 12. Continuation of sequence processing (fig. 11): oscillogram of the 7th pulse of the sequence (*a*); normalized spectral power density of the 7th pulse (*b*); oscillogram of the 11th pulse of the sequence (*c*); normalized spectral power density of the 11th pulse (*d*).

Параметры УКИ для этого испытания рассмотрим на примере 2-го импульса длительностью между экстремумами 11.7 мкс (рис. 13, *в*; рис. 14, *а*) с условной несущей 43 кГц, и 6-го импульса длительностью между экстремумами 10.1 мкс (рис. 13, *в*; рис. 14, *в*) с условной несущей 50 кГц. Ширина спектральной плотности мощности 2-го импульса по уровню –3 дБ составляет 22 кГц в пределах 21–43 кГц, а по уровню –10 дБ ширина спектра составляет 48.8 кГц в пределах 12.2–61 кГц (рис. 14, *б*). Ширина спектральной плотности мощности 6-го импульса по уровню –3 дБ составляет 20 кГц и находится в пределах 21–41 кГц. Ширина по уровню –10 дБ составляет 61 кГц и находится в пределах 12–73 кГц (рис. 14, *г*). В данном примере изменение частоты условной несущей смещено в низкочастотную область.

При решении задачи сопровождения цели дельфин использует стратегию длительного акустического контакта с объектом сопровождения, но с вынужденными перерывами на временном интервале 4.5 ÷5.5 с и 7.3 ÷ 8.3 с (рис. 15, *а*) [10]. Потеря контакта и восстановление контакта на этих временных промежутках отчетливо выражено на графике (рис. 15, *б*) увеличением разброса значений интервала между импульсами от 42 мс до 70 мс. Изменения интервала между импульсами связано с вынужденной перестройкой дыхательного акта, потерей в этот момент цели и последующим восстановлением акустического контакта, что и представлено на рис. 15. Основной диапазон минимального изменения интервала выделен пунктирными линиями, а сплошная линия — интервал между импульсами при работе идеального наблюдателя. Условия эксперимента в этом опыте — дальность до цели 35 м, глубина погружения дельфина 1.5 м гидрофон расположен на расстоянии 15 м на глубине 1.5 м.

Рис. 13. Полная последовательность сигналов в одном испытании при решении задачи обнаружения подводных объектов на дистанции 2 м: осциллограмма длительностью ~107 мс состоит из 6 УКИ (*а*); зависимость интервала между импульсами от номера интервала по порядку (*б*); зависимость изменения интервала между экстремумами от номера импульса по порядку (*в*).

Fig. 13. The complete sequence of signals in a single test in the solution of the problem of detecting underwater objects at a distance of 2 m: waveform with duration ~107 ms consists of 6 USP (*a*); the dependence of the pulse interval from number interval in order (*b*); dependence of change of the interval between the extrema of the room impulse order (*c*).

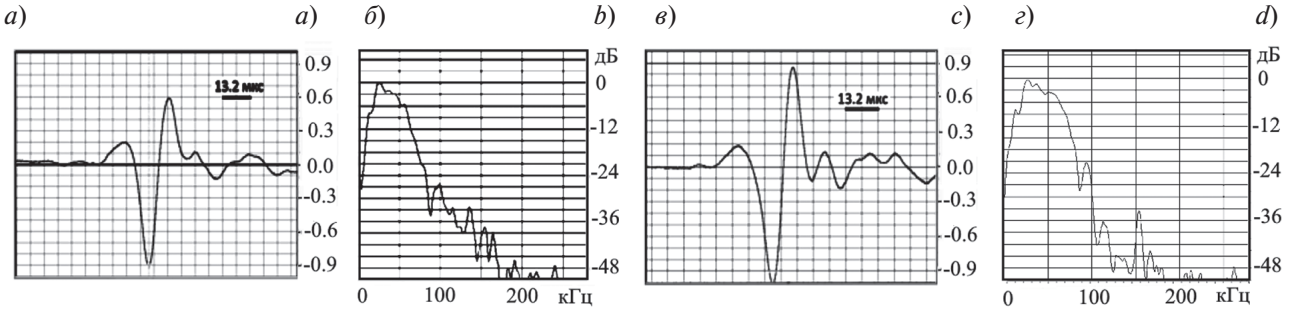

Рис. 14. Продолжение обработки последовательности (рис. 13): осциллограмма 2-го импульса из последовательности (*а*); нормированная спектральная плотность мощности 2-го импульса (*б*); осциллограмма 6-гоимпульса из последовательности (*в*); нормированная спектральная плотность мощности 6-го импульса (*г*).

Fig. 14. Continuation of sequence processing (fig. 13): oscillogram of the 2nd pulse from the sequence (*a*); normalized spectral power density of the 2nd pulse (*b*); oscillogram of the 6th pulse from the sequence (*c*); normalized spectral power density of the 6th pulse (*d*).

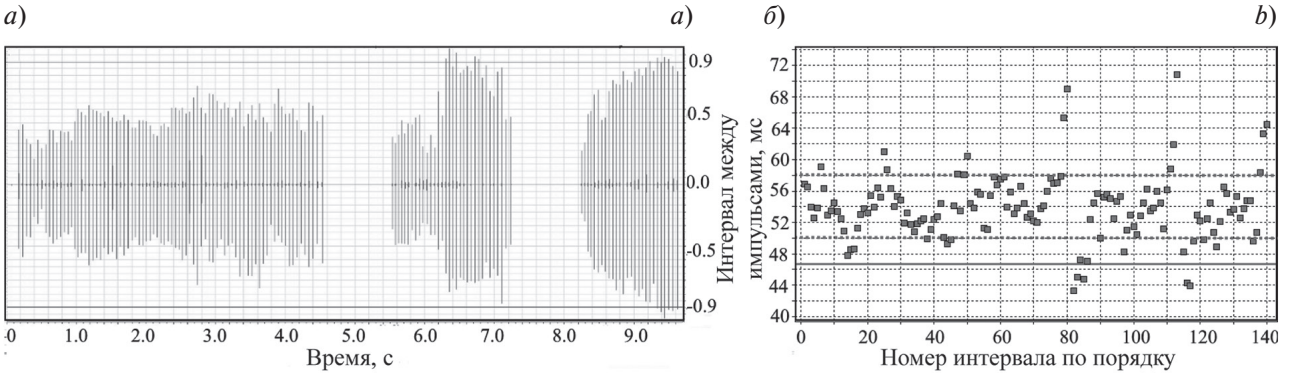

Рис. 15. Нормированная последовательность импульсов при решении задачи сопровождения цели (*а*); динамика изменения интервалов между импульсами; основной диапазон интервала выделен зелеными пунктирными линиями (*б*); красная линия — интервал между импульсами при работе идеального наблюдателя.

Fig. 15. The normalized sequence of pulses solving the task of tracking the target (*a*); dynamics of changes in the intervals between pulses (the main range of the interval is highlighted with green dotted lines (*b*); the red line — the interval between pulses when working as an ideal observer.

При решении задачи сопровождения цели дельфин, как правило, излучает множество импульсов с временем перекрытия $M_{\text{перекр.}} = 1.1 \div 1.4$. Амплитуда импульсов переменная, т. к. цель смещается, а дельфин старается не потерять контакт с целью. Зная среднюю величину интервала между импульсами 54 мс, ограниченную сверху величиной 58 мс и снизу 50 мс, и интервал работы идеального наблюдателя 46.6 мс находим среднее значение коэффициента перекрытия, которое для данного эксперимента составило $M_{\text{ср.перекр.}} = 1.15 \pm 0.09$. В данном случае уменьшение значения коэффициента перекрытия меняет стратегию [34] поиска, что приводит к оптимизации процесса поиска.

На рис. 16 представлена динамика изменения интервала между экстремумами, осциллограмма и спектральная плотность мощности самого короткого импульса в процессе сопровождения подвижной цели в течении 10 с. Интервал между экстремумами меняется от 2.5 мкс до 5.6 мкс (рис. 16, *а*) или условной несущей от 86 кГц до 200 кГц. Осциллограмма самого короткого импульса представляет собой набор из 2–3 импульсов разных по амплитуде и их условной несущей (рис. 16, *б*) Выраженные резонансы на частотах 95 и 178 кГц (рис. 16, *в*) с некоторыми вариациями характерны практически для всех сигналов в этой последовательности. Сигналы с резонансом на частоте 280 кГц по уровню –12 дБ относительно максимума и резонанс на частоте 390 кГц по уровню –27 дБ — редкое явление, т. к. их частотная характеристика гораздо шире, чем частотная характеристика приемной системы дельфина белухи, ограниченной 160÷200 кГц. Является ли это артефактом или существует закономерность появления таких коротких импульсов — предстоит еще выяснить в экспериментах с использованием мишени с различной силой цели и дальности до объекта поиска. Данный пример показывает, что расширение частотного диапазона тракта регистрации показывает совершенно новые данные [10], которые не имеют сегодня объяснения. Расширенный частотный диапазон импульса в область частот, не воспринимаемую слуховой системой дельфина, настораживает, однако, как видно на графике (рис. 16, *а*), максимальный диапазон разброса интервала между экстремумами приходится на диапазон от 45 до 115 импульса. В этом промежутке цель перемещалась вдоль сектора обзора, дельфин теряет цель и снова находит, что заметно и при анализе интервалов между импульсами, который имеет максимальный разброс данных именно в этом интервале (рис. 15, *б*). Измерение интервала между экстремумами у импульсов с максимальной амплитудой от 125 до 135 импульсов составило величину 3.3÷3.4 мкс с условной несущей 147÷151 кГц, что соответствует ширине спектра основного лепестка 300 кГц, что также значительно выше частотного диапазона слухового восприятия белухи. Аналогичные результаты в импульсах с 16 по 18 (рис. 16, *а*).

Рассмотрим изменение коэффициента перекрытия (КП) в зависимости от стратегии поиска: правильное обнаружение / пропуск цели / правильное не обнаружение / ложная тревога (рис. 17) [36].

Наибольшее количество значений получено для ситуации правильного обнаружения (рис. 17, *а*) как наиболее часто повторяемые испытания. Причем, чем меньше расстояние между дельфином и объектом поиска, тем больше размах КП. Увеличенный размах изменения КП показывает ответственное отношение дельфина к выполняемому заданию, т. к. пятно освещенности на малых расстояниях имеет малый диаметр, то для освещения пространства большего диаметра необходимо излучить большее количество сигналов,

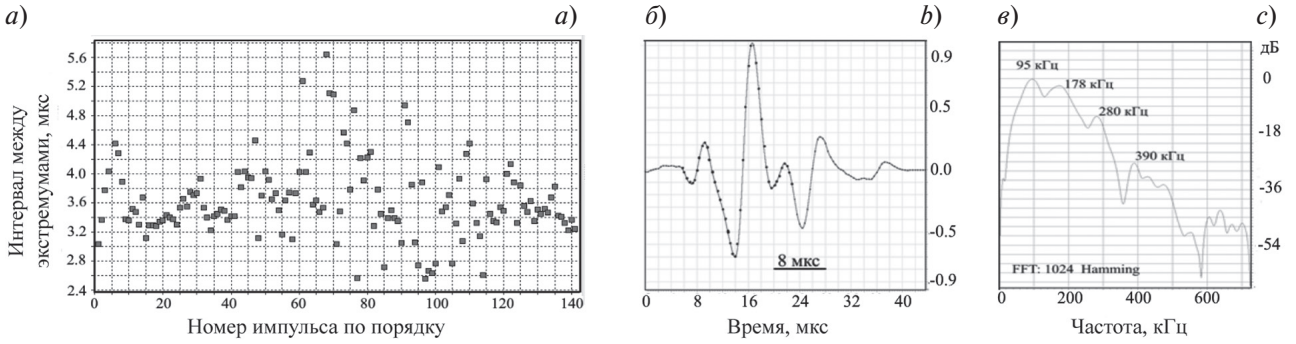

Рис. 16. Динамика изменения интервала между экстремумами (*а*); осциллограмма 97-го импульса (*б*) и его спектральная плотность мощности (*в*).

Fig. 16. Dynamics of changes in the interval between extrema (*a*); oscillogram of the 97th pulse (*b*) its spectral power density (*c*).

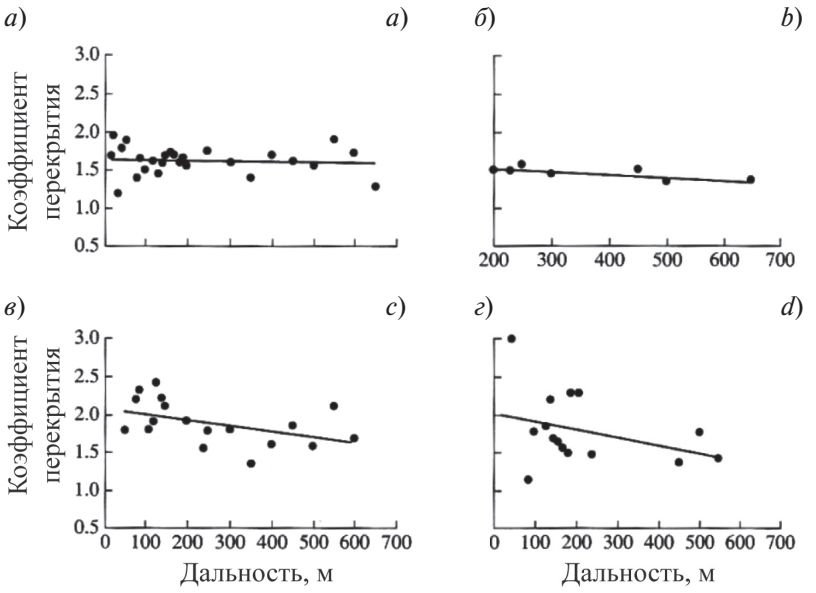

Рис. 17. Динамика изменения коэффициента перекрытия в зависимости от дальности до объекта поиска для случаев принятия следующих решений: правильное обнаружение (*а*), пропуск цели (*б*), правильное не обнаружение (*в*), ложная тревога (*г*); каждая точка на графике — это среднее значение по 5÷10 испытаниям.

Fig. 17. Dynamics of changes in the overlap coefficient depending on the distance to the search object for cases of making the following decisions: correct detection (*a*), missing the target (*b*), correct non — detection (*c*), false alarm (*d*); each point on the graph is the average value for 5 to 10 tests.

чем при поиске цели на больших дистанция. Высказанная гипотеза подтверждается графиком правильного не обнаружения (рис. 17, *в*), в котором разброс значений КП необходим, чтобы внимательнее обследовать сектор обзора. В ситуации с пропуском цели (рис. 18, *б*) разброс значений КП минимальный, что связано с априори решенной дельфином задачи, т. е. «поторопился» и не обследовал пространство. Самый большой разброс КП=1.1÷3.0 представлен на графике, демонстрирующем ложную тревогу (рис. 17, *г*), что определяется малым количеством данных, т. к. ошибки типа ложной тревоги, как правило, недостаточно, Наибольшее количество этих ошибок связано с испытаниями, проведенными на дистанции 200 м (начало пологой береговой зоны), т. е. с зоной повышенной реверберации.

4. Обсуждение

Максимальный уровень акустического давления сигналов эхолокации у дельфина афалины составляет 220 дБ/мкПа/м, а у дельфина белухи достигает 230 дБ/мкПа/м. Коэффициент перекрытия меняется в зависи-

мости от дальности объекта поиска, а также от задачи, которую решает дельфин (поиск в условиях естественных помех, поиск в условиях преднамеренных помех, распознавание или сопровождение цели) [9, 14, 15, 19, 24, 36, 37]. В условиях сближения с целью на дистанцию менее 1 м коэффициент перекрытия увеличивается в ~8 раз. При решении задач поиска цели при удалении объекта на дистанции до 650 м среднее значение коэффициента перекрытия меняться от 1.1 до 1.8 в ситуации наличии объекта поиска, а при отсутствии объекта поиска меняется от 1.8 до 4. Задержка сигнала относительно идеального наблюдателя включает в себя различные временные интервалы, связанные с длительностью обработки импульса или пакета импульсов, характером принятия решения, которое зависит от предыдущих успешных или не успешных результатов испытаний [27, 38]. Время обработки и принятия решения при моноимпульсной эхолокации в задаче поиска цели на дистанции от 10 м до 120 м составляет величину 20 мс. Изменение задержки связано с физическими параметрами среды или психофизиологическими показателями состояния и неучтенными стресс факторами, которые приводят к ошибкам типа «пропуск цели» или «ложная тревога». Считается, что каждый вид активности животных осуществляется при достижении оптимального уровня возбуждения. Как недостаток, так и избыток возбуждения снижают эффективность деятельности. Существует гипотеза о том, что именно оптимизация уровня возбуждения является универсальным механизмом поведения животных [39]. Факторами оптимизации может быть пища, ее отсутствие или степень насыщения. Отвлекающие факторы связаны с половыми предпочтениями (период гона) или дружескими отношениями с членами стада. Как показали наши эксперименты, отсутствие пищевого подкрепления во время работы приводит к успешной стабилизации результатов, причем результаты хорошо повторяемы, а пищевое вознаграждение и игровое поведение после опытов является необходимым условием, ведущим к успеху взаимодействия экспериментатора с животным.

Ширина спектральной плотности мощности биоакустических сигналов при решении задачи обнаружения цели на дистанциях менее 2 м по уровню −10 дБ составляет 61 кГц и находится в пределах от 12 до 73 кГц (рис. 14, *г*), что заметно ниже ширины спектральной плотности мощности при поиске цели удаленной от дельфина на расстояние 600 м, которая по уровню −10 дБ составляет 117 кГц в области частот от 29 кГц до 146 кГц (рис. 4, 5).

Таким образом выявлен странный феномен: чем ближе находится цель, тем меньше высокочастотных составляющих в сигналах эхолокации. В технике импульсной эхолокации с монохроматической несущей обратная ситуация: если надо увидеть цель дальше, необходимо снизить частоту несущей, а если цель близко, — то повысить частоту несущей, чтобы увидеть, как можно больше блестящих точек. Результаты экспериментов на больших дальностях обнаружения природным сонаром (сонаром дельфина) показали, что при использовании сверхширокополосных сигналов происходит насыщение сигнала высокочастотными составляющими, что приводит к сужению диаграммы направленности излучения, а возможно и пространственной характеристики приема. Когда цель находится близко, встает задача — не выпустить цель из поля наблюдения (особенно для быстро подвижных целей), а для этого необходимо расширить диаграмму направленности излучения и приема, т. е. сместить частотную область в область низких частот, тем самым расширяя диаметр пятна освещенности за счет смещения излучения в область низких частот. Выявленный феномен является необходимым условием оптимальной работы сонара, использующего сверхширокополосные сигналы. К сожалению, для подтверждения этой гипотезы данных недостаточно.

Представленный анализ экспериментальных данных показывает связь между частотно-временными характеристиками излучаемых дельфином сигналов и их пространственно-временными параметрами. В технических гидроакустических системах, использующих узкополосные сигналы, при увеличении дальности частоту несущей снижают. В сверхширокополосной биологической системе спектральные характеристики сигналов эхолокационного поиска смещаются в более высокочастотную область. Сравнение технического и биологического сонаров в интересах совершенствования средств подводного наблюдения возможно только на основе параллельного эксперимента [16].

В первых экспериментах с использованием искусственной помехи представлены феноменологические данные адаптивных изменений в излучаемых дельфином сигналах [29]. Эти изменения формируют параметры, определяющие помехозащищенность сонара дельфина, использующего сверхширокополосные сигналы, сосредоточенные во времени, с оперативно изменяемыми частотно-временными и пространственными характеристиками поля излучения. Сегодня понятно, как перейти от решения задач регистрации сигналов в стесненных условиях малого бассейна или ванны к работе в открытой воде с необходимой стабилизацией животного в пространстве и точной его ориентацией в сектор обзора.

Несмотря на достаточно удачную методику, описанную в данной работе, остались нерешенные задачи методического характера, связанные с возможностью сканирования дельфином диаграммой направленностью во время поиска цели. Поворот максимума пространственной характеристики поля излучения

в секторе ±10° вполне возможен, для этих целей и служит подвижный рефрактор, но как заставить животное не использовать этот механизм остается пока загадкой. В записанных акустических сигналах во время одного испытания содержатся импульсы с минимальными колебаниями длительности между экстремумами (изменения во втором знаке после запятой) и с большим разбросом длительности между экстремумами (от 3 мкс до 8 мкс). С какими процессами связаны эти колебания ответить трудно. Дельфин способен изменять профиль поля излучения, создавать одновременно два луча, изменять параметры излученного сигнала. т. к. имеется шесть излучателей, рефрактор и рефлектор. Сейчас предполагается, что в области ±2° в поле излучения, сигнал дельфина практически не меняется. При размещении точки регистрации на расстоянии 50 м (диаметр освещенной области составляет ~ 4 м) от животного предполагается минимальное изменение параметров излучения. В условиях свободного старта дельфин самостоятельно выбирает глубину погружения [20], а в методике фиксированного положения головы животного в вертикальной плоскости дельфин опускается на заданную глубину крепления кольца, которая определяет геометрическую дальность. Это неучтенные методические факторы, которые требуют дополнительного внимания в будущих исследованиях.

В работе по исследованию режимов излучения пакетов импульсов [24] показано, что длительность паузы может быть меньше длительности пакета импульсов. Этот показатель настораживает и требует независимой проверки, т. к. в наших экспериментах такие случаи встречаются редко. Иногда такие серии встречаются в испытаниях с большим количеством ошибок, связанных с неудачами в предыдущих испытаниях.

5. Заключение

Исследование сонара китообразных в естественных условиях обитания без специальной методики эксперимента с детерминированными поведенческим актам и без использования многоканальной широкополосной системы регистрации остаются на уровне феноменологии. Проведение научных работ по классификации сигналов, сравнение сигналов внутри вида или между видами, при решении различных задач обнаружения, распознавание, сопровождение цели должны опираться на стандартные эксперименты, в которых двигательные акты животного и акустическое сопровождение при решении задачи было бы однозначно интерпретируемо. Представленные в данной статье методические приемы работы с дельфином позволяют не только достоверно расшифровывать полученные данные при решении задач: обнаружение объектов в сложных акустических условиях изменения дальности до объекта; преднамеренное изменение помеховой обстановки; распознавание подводных объектов; сопровождение цели и т. д., для исследования помехозащищенности сверхширокополосного сонара, но и сопоставить этих данных с работой технического аналога при их работе в параллельном эксперименте. Такие эксперименты необходимы, чтобы точно обозначить спектр ключевых технологий [8, 16], которые позволят исследовать сверхширокополосный сонар как в статическом режиме эхолокации [8, 16, 38], так и режиме динамического поиска [40]. В представленных методических приемах поведение дельфина обусловлено акустическими командами и акустической ответной реакцией. Дельфин добровольно выходит на старт, выполняет команду «поиск», не выпрашивая пищевого вознаграждения, т. к. получает пищу перед экспериментом и после него. Такое независимое поведение дельфина при отказе от пищевого подкрепления определяет длительность поиска во время испытания и позволяет точно оценить необходимое количество сигналов дельфину для принятия решения [36].

В представленной работе приводятся не графические иллюстрации работы сонара дельфина при изменении: длительности поиска, режима излучения, изменения количества импульсов или пакетов импульсов, динамику изменения условной несущей и коэффициента перекрытия, а приводятся иллюстрации излучения дельфина в данных испытаниях. В этих иллюстрациях наглядно представлена полная последовательности простых импульсов с минимальной базой ($\Delta f^* t_{имп.} \approx 1$, где Δf — ширина спектра отдельного импульса, $t_{имп.}$ — длительность импульса), а также пакеты импульсов с ВИМ и это — сложные сигналы с огромной базой ($\Delta f^* T_{пакета} >> 1$, например, при длительности пакета 500 мс база пакета возрастает до 100000). Проиллюстрированы временные и количественные параметры импульсов и динамику изменения условной несущей. Динамика изменения условной несущей и динамика изменения интервала между импульсами в пакетах создают условия для целенаправленного кодирования пакетов импульсов как по частоте условной несущей, так и с помощью ВИМ. Для того чтобы точно понимать, какие модуляции дельфин использует при решении задач в сложных условиях акустических помех, необходимо не только совершенствовать методические приемы биоакустического эксперимента, но и совершенствовать аппаратную часть, расширяя частотный диапазон регистрирующего комплекса. Частотный диапазон комплекса регистрации должен включать не только основной лепесток частотной характеристики

сигнала (90 % энергии), но и расширенный диапазон, включая дополнительные лепестки АЧХ импульса. Понятно, что, расширяя АЧХ приемного тракта увеличивается и частота квантования. Полученные результаты с расширенной АЧХ дают возможность провести более подробный анализ импульсов, используя информацию по дополнительным лепесткам. Так, например, у импульса с ЧМ отсутствуют дополнительные лепестки в спектре плотности мощности, а однопериодные биполярные импульсы имеют ярко выраженные дополнительные лепестки.

В экспериментах с использованием фантомного эха получены результаты о разрешающей способности [26] сонара дельфина при оценке дельфинам изменение интервала между импульсами в пакетах, которая составила величину менее 1 мкс, т.е. уходим в область наносекунд. В этой же работе [26] авторы приводят данные различения дельфином фазы отраженного эха. Эта работа стимулирует дальнейшие точные измерения работы природного сонара для того, чтобы понять механизмы обработки эхо-сигналов, длительность которых во много раз меньше скорости передачи информации между нейронами головного мозга.

Измерение коэффициента перекрытия позволяет гипотетически определить, чем занимается дельфин в данный момент времени. Если коэффициент перекрытия меньше или равен 1, то определить дальность до объекта импульсным методом невозможно. Предполагается, что такая ошибка работы сонара показывает, что дельфин занимается совершенно иной задачей, и не решает задачу поиска подводного объекта. Изменением коэффициента перекрытия выше единицы определяется порядок работы локатора. Ориентировочно порядок работы локатора по коэффициенту перекрытия для моноимпульсного и мультиимпульсного режимов работы: расширенный поиск $M_{\text{ср.перекр}} = 4$; обнаружение объекта $M_{\text{ср.перекр}} = 1.5 \div 2$; захват цели $M_{\text{ср.перекр}} < 1.5$; сопровождение цели $M_{\text{ср.перекр}} = 1.2$; распознавание цели $M_{\text{ср.перекр}} = 1.15$.

Представленные изменения параметров излучения иллюстрируются рисунками, демонстрирующие манипуляцию временными параметрами импульсов в пакетах и манипуляциями изменения спектральных параметров импульсов. Изучение закономерностей работы биологического сонара в сложных условиях преднамеренных акустических помех позволит найти технические решения совершенствования гидроакустической аппаратуры нового поколения, основанной на использовании сверхширокополосных простых и сложных сигналов [38].

В будущих измерениях необходимо учесть новые гипотезы работы сонара дельфина. Предполагается, что на больших расстояниях между дельфином и объектом поиска животные могут использовать длинные низкочастотные (менее 30 кГц) частотно-модулированные импульсы [41]. Но в настоящее время в условиях прямого эксперимента до 700 м [20], а также в экспериментах с применением фантомного эха [38] такие сигналы не обнаружены.

6. Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания (тема 0149–2019–0015).

Литература

1. *Айрапетьянц Э.Ш.*, *Константинов А.И.* Эхолокация в природе. Л.: Наука, 1974. 512 с.
2. *Au W.W.L.* The Sonar of Dolphins. New York: Springer-Verlag, 1993. 227 p.
3. *Беликов Р.А.*, *Белькович В.М.* Свисты белух в репродуктивном скоплении у о. Соловецкий в Белом море // Акустический журнал. Т. 53, № 4. 2007. С. 601–608.
4. *Белькович В.М.*, *Хахалкина Э.Н.* Этолого-акустические корреляты черноморской афалины // Черноморская афалина *(Tursiops truncates ponticus) /* Под ред. В.Е. Соколова, Е.В. Романенко. М., 1997. С. 513–543.
5. *Титов А.А.* Исследование звуковой активности и феноменологических характеристик эхолоционного анализатора черноморских дельфинов. Дис. канд. биол. наук. Карадаг, 1972.
6. *Au W.W.L.*, *Floyd R.W.*, *Penner R.H.*, *Murchison A.E.* Measurement of echolocation signals of the Atlantic bottlenose dolphin, *Tursiops truncatus Montagu*, in open waters // J. Acoust. 1974. Soc. Am. 56, P. 1280–1290. doi: 10.1121/1.1903419
7. *Au W.W.L.*, *Hastings M.C.* Principles of Marine Bioacoustics. Springer, New York. 2008. 679 p.
8. *Иванов М.П.*, *Родионов А.А.* Технологии аттестации акустической системы китообразных // Труды X Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» РАН. 27–30 мая 2010. С. 29–34.
9. *Рутенко А.Н.*, *Вишняков А.А.* Временные последовательности гидроакустических сигналов, генерируемых белухой при поиске и лоцировании подводных объектов // Акустический журнал. 2006. Т. 52, № 3. С. 375–384.
10. *Иванов М.П.*, *Бутов С.Н.*, *Леонова Л.Е.*, *Романовская Е.В.*, *Стефанов В.Е.* Апробация лабораторного макета регистрации сигналов дельфинов с расширенной полосой частот сквозного тракта // Акустический журнал. 2019. Т. 65, № 5. С. 699–707. doi: 10.1134/S0320791919050101

11. *James J. Finneran*, *Brian K. Branstetter*, *Dorian S. Houser*, *Patrick W. Moore*, *Jason Mulsow*, *Cameron Martin*, *Shaun Perisho*. High-resolution measurement of a bottlenose dolphin's (*Tursiops truncatus*) biosonar transmission beam pattern in the horizontal plane // J. Acoust. Soc. Am. 2014. 136 (4). P. 2025–2038.
12. *Ау У.У.Л.* Эхолокационные сигналы, издаваемые дикими дельфинами // Акустический журнал. 2004. Т. 50, № 4. С. 533–542.
13. *Douglas P. Nowacek, Lesley Y. Thorne, David W. Johnston*, *Peter L. Tyack* Responses of cetaceans to anthropogenic noise // Mammal Review. 2007. 37, № 2, С. 81–115.
14. *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. 2009. V. 31, Pt. 1. P. 22–28.
15. *Айрапетьянц Э.Ш.*, *Сергеев Б.Ф.*, *Иваненко Ю.В.*, *Нонин Ю.А.*, *Чилингирис В.И.*, *Иванов М.П.* Изменение локационных сигналов дельфинов в процессе дифференцирования сферических и цилиндрических мишеней // Тез. Докл. V Всесоюзного совещания по изучению морских млекопитающих. Махачкала, 1972. Ч. 2. С. 234.
16. *Иванов М.П.*, *Родионов А.А.*, *Калацкий Ю.М.* Новые технологии исследования сонара китообразных // Труды XII Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» (ГА-2014), Санкт-Петербург, 27–29 мая, 2014. С. 16–20.
17. *Magnus Wahlberga*, *Frants H. Jensen*, *Kristian Beedholm*, *Lars Bejder*, *Cla´udia Oliveira*, *Marianne Rasmussen*, *Malene Simon*, *Anne Villadsgaard*, *Peter T. Madsenb*. Source parameters of echolocation clicks from wild bottlenose Dolphins (*Tursiops aduncus* and *Tursiops truncatus*) // J. Acoust. Soc. Am. 2011. 130 (4), October. P. 2263–2274. doi: 10.1121/1.3624822
18. *Иванов М.П.*, *Попов В.В.* Характеристика акустического излучения сонара дельфина в процессе обнаружения различного класса подводных объектов на предельных дистанциях // Морские млекопитающие. Тез. Докл. VII Всесоюзн. Совещ. Симферополь, сент. 1978. М., 1978. С. 141–142.
19. *Au W.W.L.*, *Penner R.H.* Target Detection in Open Waters by an Echolocation Atlantic Bottlenose Dolphin (*Tursiops truncates*) // J. Acoust. Soc. Am. 1974. V. 68, № 4. P. 1077–1084.
20. *Иванов М.П.* Эхолокационные сигналы дельфина при решении задач в сложных акустических условиях // Акустический журнал. 2004. Т. 50, № 4. С. 550–561.
21. *Au W.W.L.*, *Hastings M.C.* Principles of Marine Bioacoustics. Springer, New York, 2008. 679 p.
22. Быстродействующий внешний модуль ввода-вывода фирмы L–CARD. Россия. URL: https://www.lcard.ru/products/external/e20-10 (дата обращения: 12.10.2020)
23. *Измайлов Д.Ю.* Виртуальная измерительная лаборатория PowerGraph. Россия. URL: http://powergraph.ru/soft/pub.asp (дата обращения: 12.10.2020).
24. *James J. Finneran.* Dolphin "packet" use during long-range echolocation tasks // The Journal of the Acoustical Society of America. 2013. 133, 1796. doi: 10.1121/1.4788997
25. *Иванов М.П., Мухачев Е.В., Исаков Д.Ю., Данилов Н.А., Овчинников К.В., Розум А.В., Соколов П.А.* Идентификация сигналов дельфина в условиях лабораторного эксперимента в открытой воде // Прикладные проблемы безопасности технических и биотехнических систем. 2018. № 2. С. 14–24. doi: 10.25960/2500–2538.2018.2.14
26. *James J. Finneran*, *Ryan Jones*, *Jason Mulsow*, *Dorian S. Houser*, *Patrick W. Moore* Jittered echo-delay resolution in bottlenose dolphins (*Tursiops truncates*) // Journal of Comparative Physiology A. Received: 1 July 2018. doi: 10.1007/s00359–018–1309–6
27. *Гиро Л.З.* О зависимости частоты следования эхолокационных сигналов дельфинов от сложности эхолокационной задачи // Морское приборостроение, сер.: акустика. 1972. В.2. С. 84–94.
28. *Au W.W.L.*, *Penner R.H.* Detection in a Noise by Atlantic Bottlenose Dolphin // J. Acoust. Soc. Am. 1981. V. 70, № 6. P. 687–693.
29. *Романенко Е.В.* Акустика дельфинов и рыб (обзор) //Акустический журнал. 2019. 65, № 1. С. 82–92. doi: 10.1134/S0320791919010088
30. *Buckstaff K.C.* Effects of watercraft noise on the acoustic behavior of bottlenose dolphins, *Tursiops truncatus*, in Sarasota Bay, Florida // Mar Mammal Sci. 2004. 20:709–725.
31. *Nikolina Rako Gospić*, *Marta Picciulin.* Changes in whistle structure of resident bottlenose dolphins in relation to underwater noise and boat traffic // Marine pollution bulletin. 2016. doi: 10.1016/j.marpolbul.2016.02.030
32. *Douglas P. Nowacek*, *Lesley Y. Thorne*, *David W. Johnston*, *Peter L. Tyack* Responses of cetaceans to anthropogenic noise // Mammal Review. 2007. 37, № 2. P. 81–115.
33. *Au W.W.L.*, *Moore P.W.B., Pawloski D.A.* Detection of complex echoes in noise by an echolocating dolphin // J. Acoust. Soc. 1988. Am. 83, 662–668.
34. *James J. Finneran.* Dolphin strategies for long-range object detection and change detection // J. Acoust. Soc. Am. 2013. 133, 3406. doi: 10.1121/1.4805940

35. *Frants H. Jensen* Acoustic behavior or bottlenose dolphins and pilot whales. PhD dissertation. Thesis, Zoophysiology, Department of biological Sciences, University of Aarhus, Denmark, 2011. 195 p.

36. *Иванов М.П.* Эхолокационные сигналы дельфина (*Tursiops truncatus*) при обнаружении и распознавании подводных объектов. Дисс. канд. биол. наук. Санкт-Петербург, 2000. С. 137.

37. *Акопиан А.И.* Исследование закономерности изменения частоты следования эхолокационных сигналов дельфина *Tursiops truncates*. Дисс. канд. биол. наук. Санкт-Петербург, 1995. 138 с.

38. *James J. Finneran*. Multi-echo processing by a bottlenose dolphin operating in "packet" transmission mode at long range // J. Acoust. Soc. Am. 136, 2876. 2014. doi: 10.1121/1.4898043

39. *Попов С.В.* Неопределенность внешней среды и возбуждение // Стресс как детерминанта поведения. 2010. Т. 71, № 4, июль — август. С. 287–297.

40. *Michael Ladegaard*, *Jason Mulsow*, *Dorian S. Houser*, *Frants Havmand Jensen*, *Mark Johnson*, *Peter Teglberg Madsen*, *James J. Finneran*. Dolphin echolocation behaviour during active long-range target approaches // Journal of Experimental Biology. 2019. 222, jeb189217. doi: 10.1242/jeb.189217

41. *Рябов В.А.* Некоторые аспекты отражения ЧМ-сигналов (свистов) дельфинов в экспериментальном бассейне // Акуст. журн. 2006. 65, № 6. С. 853–860. doi: 10.1134/S0320791919060133

References

1. *Ayrapetyanets E.*, *Konstantinov A.* Echolocation in nature. *L.*, *Nauka*, 1974. 512 p. (in Russian).

2. *Au W.W.L.* The Sonar of Dolphins. New York, Springer-Verlag, 1993. 227 p.

3. *Belikov R.A.*, *Bel'kovich V.M.* Whistles of Beluga Whales in the Reproductive Gathering off Solovetskii Island in the White Sear. *Acoustical Physics*. 2007, 53, 528–534.

4. *Bel'kovich V.M.*, *Hahalkina E.N.* Etologo-acoustic correlates of the Black Sea bottlenose dolphins. *The Black Sea bottlenose dolphin* (*Tursiops truncates ponticus*) / Eds. V.E. Sokolova and E.V. Romanenko. *M.*, 1997, 513–543 (in Russian).

5. *Titov A.A.* Study of sound activity and phenomenological characteristics of the black dolphin systolic analyzer. *PhD Diss. Biol. Sciences*, *Karadag*, 1972 (in Russian).

6. *Au W.W.L.*, *Floyd R.W.*, *Penner R.H.*, *Murchison A.E.* Measurement of echolocation signals of the Atlantic bottlenose dolphin *Tursiops truncates* Montagu in open water. *J. Acoust. Soc. Am*. 1974, 56, 4, 1280–1290.

7. *Au W.W.L.*, *Hastings M.C.* Principles of Marine Bioacoustics. *Springer*, *New York*, 2008, 679 p.

8. *Ivanov M.P.*, *Rodionov A.A.* Cetacean Acoustic System Appraisal Technologies. *Proceedings X of the All-Russian Conference* "*Applied Hydroacoustics and Hydrophysics*" *of the Russian Academy of Sciences*. May 27–30, 2010, 29–34 (in Russian).

9. *Rutenko A.N.*, *Vishnyakov A.A.* Time Sequences of Sonar Signals Generated by a Beluga Whale When Locating Underwater Objects. *Acoust. Phys.* 2006, 52, 3, 314–323 doi: 10.1134/S1063771006030122

10. *Ivanov M.P.*, *Butov S.N.*, *Leonova L.E.*, *Romanovskay E.V.*, *Stefanov V.E.* Testing of a Laboratory Prototype for Recording Dolphin Signals with an Extended Frequency Band of the Through. *Acoust. Phys.* 2019, 65, 5, 603–610.

11. *James J. Finneran*, *Brian K. Branstetter*, *Dorian S. Houser*, *Patrick W. Moore*, *Jason Mulsow*, *Cameron Martin*, *Shaun Perisho*. High-resolution measurement of a bottlenose dolphin's (*Tursiops truncatus*) biosonar transmission beam pattern in the horizontal plane. *J. Acoust. Soc. Am*. 2014, 136 (4), 2025–2038.

12. *Au W.W.L.* Echolocation signals of wild dolphins. *Acoust. Phys.* 2004, 50, 454–462. doi: 10.1134/1.1776224

13. *Douglas P. Nowacek*, *Lesley Y. Thorne*, *David W. Johnston*, *Peter L. Tyack* Responses of cetaceans to anthropogenic noise. *Mammal Review*. 2007, 37, 2, 81–115.

14. *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.* 2009, 31, 1, 2009, 22–28.

15. *Ayrapetyanc E.S.*, *Sergeyev B.F.*, *Ivanenko Y.V.*, *Nonin Y.A.*, *Chilingiris V.I.*, *Ivanov M.P.* Changing the location signals of dolphins in the process of differentiating spherical and cylindrical targets. *Tez. Dokl. V All-Union Meet. to Study Marine Mammals*. *Makhachkala*, 1972, 2, 234 p. (in Russian).

16. *Ivanov M.P.*, *Rodionov A.A.*, *Kalatsky Yu.M.* New technologies for cetacean sonar research. *Proceedings of the 12th All-Russian Conference* "*Applied Technologies of Hydroacoustics and Hydrophysics*" (*GA-2014*), *St. Petersburg*, 27–29 May 2014, 16–20 p. (in Russian).

17. *Magnus Wahlberga*, *Frants H. Jensen*, *Kristian Beedholm*, *Lars Bejder*, *Cla´udia Oliveira*, *Marianne Rasmussen*, *Malene Simon*, *Anne Villadsgaard*, *Peter T. Madsenb*. Source parameters of echolocation clicks from wild bottlenose dolphins (*Tursiops aduncus* and *Tursiops truncatus*). *J. Acoust. Soc. Am*. 130 (4), October, 2011, 2263–2274. doi: 10.1121/1.3624822

18. *Ivanov M.P.*, *Popov V.V.* Characteristics of the acoustic radiation of the dolphin sonar in the process of detecting different class of underwater objects at extreme distances. *Marine Mammals*. *Tez. Dockl. VII All-Union*. *Meeting*. *Simferopol*. *M.*, 1978, 141–142 (in Russian).

19. *Au W.W.L.*, *Penner R.H.* Target Detection in Open Waters by an Echolocation Atlantic Bottlenose Dolphin (*Tursiops truncates*). *J. Acoust. Soc. Am*. 1974, 68, 4, 1077–1084.
20. *Ivanov M.P.* Dolphin's echolocation signals in a complicated acoustic environment. *Acoustical Physics*. 2004, 50, 469–479. doi: 10.1134/1.1776226
21. *Au W.W.L.*, *Hastings M.C.* Principles of Marine Bioacoustics. *Springer*, *New York*, 2008. 679 p.
22. High-speed external I / O module from L–CARD. Russia. URL: https://en.lcard.ru/products/external/e20–10 (date of access: 12.11.2020).
23. *Izmailov D. Yu*. PowerGraph virtual measuring laboratory. Russia.URL: http://powergraph.ru/soft/pub.asp (date of access: (12.10.2020).
24. *James J. Finneran* Dolphin "packet" use during long-range echolocation tasks. *J. Acoust. Soc. Am*. 2013. 133, 1796. doi: 10.1121/1.4788997
25. *Ivanov M.P.*, *Mukhachev E.V.*, *Isakov D.J.*, *Danilov N.A.*, *Ovchinnikov K.V.*, *Rosum A.V.*, *Sokolov P.A.* Identification of dolphin signals in the conditions of laboratory experimentation in open water. *Applied Safety Problems of Technical and Biotechnological Systems*. 2018, 2, 14–24 (in Russian).
26. *James J. Finneran*, *Ryan Jones*, *Jason Mulsow*, *Dorian S. Houser*, *Patrick W. Moore*. Jittered echo-delay resolution in bottlenose dolphins (*Tursiops truncates*). *Journal of Comparative Physiology A*. Received: 1 July 2018. doi: 10.1007/s00359-018-1309-6
27. *Giro L.Z.* On the dependence of the repetition rate of dolphin echolocation signals on the complexity of the echolocation problem. *Marine Instrument Engineering. Ser.: Acoustics*. 1972, 2, 84–94.
28. *Au W.W.L.*, *Penner R.H.* Detection in a Noise by Atlantic Bottlenose Dolphin. *J. Acoust. Soc. Am*. 1981, 70, 6, 687–693.
29. *Romanenko E.V.* Acoustics of Dolphins and Fish (Review). *Acoust. Phys.* 2019, 65, 1, 82–92. doi: 10.1134/S1063771019010081
30. *Buckstaff K.C.* Effects of watercraft noise on the acoustic behavior of bottlenose dolphins, *Tursiops truncatus*, in Sarasota Bay, Florida. *Mar Mammal Sci*. 2004, 20:709–725.
31. *Nikolina Rako Gospić*, *Marta Picciulin*. Changes in whistle structure of resident bottlenose dolphins in relation to underwater noise and boat traffic. *Marine Pollution Bulletin*. 2016. doi: 10.1016/j.marpolbul.2016.02.030
32. *Douglas P. Nowacek*, *Lesley Y. Thorne*, *David W. Johnston, Peter L. Tyack* Responses of cetaceans to anthropogenic noise. *Mammal Review*. 2007, 37, 2, 81–115.
33. *Au W.W.L.*, *Moore P.W.B.*, *Pawloski D.A.* Detection of complex echoes in noise by an echolocating dolphin. *J. Acoust. Soc. Am*. 1988, 83, 662–668.
34. *James J. Finneran*. Dolphin strategies for long-range object detection and change detection. *J. Acoust. Soc. Am*. 2013, 133, 3406. doi: 10.1121/1.4805940
35. *Frants H. Jensen*. Acoustic behavior or bottlenose dolphins and pilot whales. *PhD Diss. Thesis*, *Zoophysiology*, *Department of biological Sciences*, *University of Aarhus*, *Denmark*, 2011, 195 p.
36. *Ivanov M.P.* Echolocation signals of a dolphin (*Tursiops truncatus*) when detecting and recognizing underwater objects. *PhD Thesis of Biological Sciences. St. Petersburg,* 2000, 137 p.
37. *Acopian A.I.* Study of the patterns of changes in the frequency of following the echolocation signals of the dolphin *Tursiops truncatus. PhD in Biological Sciences. St. Petersburg*, 1995, 138.
38. *James J. Finneran*. Multi-echo processing by a bottlenose dolphin operating in "packet" transmission mode at long range. *J. Acoust. Soc. Am*. 2014, 136, 2876. doi: 10.1121/1.4898043
39. *Popov S.V.* Uncertainty of the external environment and arousal. *Stress as a determinant of behavior*. 2010, 71, 4, July-August, 287–297.
40. *Michael Ladegaard*, *Jason Mulsow*, *Dorian S. Houser*, *Frants Havmand Jensen*, *Mark Johnson*, *Peter Teglberg Madsen*, *James J. Finneran*. Dolphin echolocation behaviour during active long-range target approaches. *Journal of Experimental Biology*. 2019, 222, jeb189217. doi: 10.1242/jeb.189217
41. *Ryabov V.A.* Some Aspects of Reflection of Dolphin FM Signals (Whistles) in an Experimental Tank. *Acoustic Physics*. 2019, 65, 6, 771–777. doi: 10.1134/S1063771019060125