

DOI 10.25960/2500-2538.2018.2.14

УДК 599.53

ИДЕНТИФИКАЦИЯ СИГНАЛОВ ДЕЛЬФИНА В УСЛОВИЯХ ЛАБОРАТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА В ОТКРЫТОЙ ВОДЕ

*М. П. Иванов, Е. В. Мухачёв, Д. Ю. Исаков, Н. А. Данилов,
К. Э. Обчинников, А. В. Розум, П. А. Соколов*

Дан широкий обзор характерных свойств акустической активности черноморской афалины в условиях лабораторного эксперимента в открытой воде. Дельфин выполнял задачу обнаружения подводных объектов в статическом режиме эхолокации. Подробно изложена методика эксперимента, рассмотрено влияние поверхностной реверберации на информативность результатов обработки эхолокационных сигналов животного. Основные выводы в статье касаются возможности и способов идентификации сигналов дельфина, участвующего в эксперименте, среди сигналов других дельфинов, находящихся поблизости.

Ключевые слова: акустические сигналы, частотная модуляция, эхолокация, морские млекопитающие, дельфин.
Keywords: acoustic signals, frequency modulation, echolocation, marine mammals, dolphins.

Введение

Идентификация акустических сигналов дельфина — одна из сложных задач исследования биоакустики китообразных. Как известно, китообразные используют набор простых и сложных сигналов, узкополосных и широкополосных, ультракоротких (УКИ) и длинных, с моночастотной и частотной модуляцией (МЧМ и ЧМ) или, в терминологии оператора, при восприятии этих сигналов на слух — свисты. Опуская гидрофон в бассейн, в котором находятся дельфины, и прослушивая водную среду в реальном масштабе времени, можно услышать многообразие завораживающих звуков. Записывая эти сигналы на магнитофон или в компьютер, можно ускорять или замедлять полученные записи и услышать красочную палитру подводного царства животного мира. Такой богатый звуковой репертуар невольно настраивает слушающего на некое таинство обитания в животном мире.

На рис. 1 представлен фрагмент акустической записи в полосе до 24 кГц; на рис. 1, *a* — осциллограмма; на рис. 1, *b* — текущий спектр (сонограмма). Фрагмент состоит из 11 пакетов импульсов, 6 частотно-модулированных (ЧМ) длинных импульсов (свисты) с различными законами модуляции и местами расположения на временной оси (S1–S6), а также импульсов эхолокации (Иэ). ЧМ длинные импульсы: S1 меняет частоту от 5 до 8 кГц; S2 — от 9 до 19 кГц по квазисинусоидальному закону на протяжении четырех периодов, длительностью каждого 32 мс; S3 — от 9 до 19 кГц по квазисинусоидальному закону на протяжении трех периодов, длительностью каждого 32 мс; S4 — от 10 до 20 кГц с использованием частотной манипуляции; S5 — от 6 до 13 кГц

с конфигурацией изменения модуляции половины периода квазисинусоиды; S6 — от 9 до 20 кГц со сложным законом модуляции. ЧМ длинные импульсы S2, S3 привязаны к пакетам импульсов и располагаются внутри пакета импульсов (1, S2; 2, S3), в конце пакета импульсов (8, S2; 9, S3) или впереди пакета (11, S3), внутри пакета и за пакетом (11, S2).

При трансформации спектра в низкочастотную область ЧМ сигналы хорошо прослушиваются оператором, а изменение законов модуляции от сигнала к сигналу показывает наличие некоторого способа кодирования ЧМ (свистовых) импульсов. Кодирование последовательности пакетов импульсов не столь очевидно, но при внимательном прослушивании выявляется различная частотная окраска многих из них. В процессе подробного исследования ЧМ сигналов показано, что каждый дельфин использует собственный ЧМ сигнал с заданным законом модуляции. Так, в приведенном фрагменте имеются четыре ЧМ сигнала с различными законами модуляции. Такие длинные ЧМ импульсы биологами рассматриваются как собственное имя животного, а на инженерном языке — решение проблемы совместности при опознавании. В этом случае предполагается рассматривать индивидуальный ЧМ длинный импульс как сигнал для решения задач ближней навигации. Индивидуальные характеристики ЧМ длинных импульсов создают условия помехозащищенности особи от сигналов других животных. По таким сигналам можно подсчитать количество животных, находящихся в одном бассейне. Длинные ЧМ сигналы дельфины используют для исполнения песен, причем длительность такого исполнения может достигать 2–3 ч (собственные наблюдения авторов).

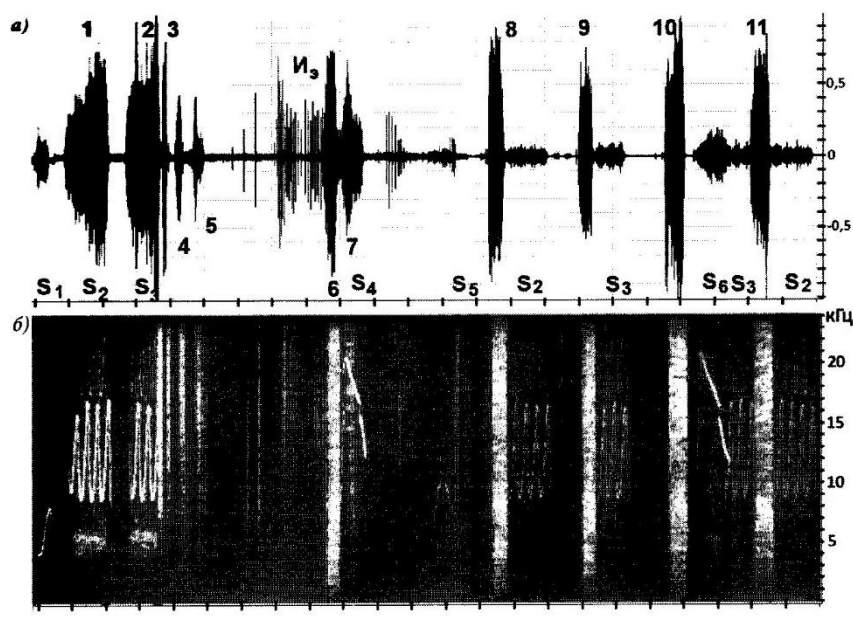


Рис. 1 Фрагмент акустической записи в полосе до 24 кГц; а — осциллограмма, б — сонограмма

Сигналы эхолокации меняются по длительности от 10 до 100 мкс в диапазоне частот от 10 до 200 кГц. Сигналы бывают знакопеременные однопериодные длительностью 10 мкс и с быстрой частотной модуляцией в пределах двух-трех периодов длительностью 20–50 мкс.

Такой богатый репертуар биоакустического разнообразия требует подробного изучения с помощью более точных методических приемов лабораторного эксперимента, в которых наблюдаемые сигналы однозначно идентифицируются с акустической обстановкой. В таком эксперименте необходимо учитывать физиологические методики опознавания двигательного поведения животного, которые точно сопоставляются с условиями опыта, и технические средства, обеспечивающие трансляцию под воду акустических команд. Для такого масштабного эксперимента необходимо иметь, как минимум, автономную двухканальную сверхширокополосную систему регистрации биоакустической активности животного во время эксперимента.

Методика эксперимента должна быть максимальной дружелюбной для экспериментального животного. Дельфин должен иметь максимальную свободу использования сонара в условиях лабораторного опыта. Необходимо обеспечить точное начало и окончание эхолокационного процесса, при этом дельфин самостоятельно определяет время поиска цели. В ходе обучения дельфина работе в условиях статического режима эхолокационного поиска подводных объектов требуется точная ориентация животного в сектор поиска. В эксперименте все двигательные реакции дельфина во время работы должны быть однозначно связаны с акустическими командами.

В работе [1] приведен обзор результатов исследований, полученных в лабораторных экспериментах в открытой воде. Сравнение акустической активности животных при регистрации сигналов дельфинов в есте-

ственной среде обитания и в условиях содержания в бассейне показывает, что репертуар акустической активности в естественной среде богаче, чем в бассейне [2].

Важно понимать, что дельфин использует широкополосные сигналы, спектрально-временные характеристики которых зависят от азимута, причем так, что на один излученный импульс разнообразие импульсов будет зависеть от количества наблюдателей. Это замечание относится к регистрации широкополосных импульсов, которые в отличие от узкополосных импульсов требуют более внимательного отношения к ориентации приемника по отношению к пространственной характеристике излучателя. Здесь подразумевается, что геометрические размеры приемника не вносят искажения в поле измерения, а пространственные характеристики приемника во всем диапазоне частот имеют минимальные искажения амплитудно-частотной характеристики (АЧХ).

Первые исследования по изучению работы сонара дельфина в сложных акустических условиях проведены на дельфине азовка (*Phocaena phocaena*) [3] с функционально выключенным зрением (на глаза надевались резиновые присоски). Эксперимент проводился в бассейне с препятствиями в виде проволоки различного диаметра. Результаты эксперимента показали, что дельфин преодолевал препятствия в виде проволоки диаметром от 4 до 2,8 мм с вероятностью уклонения 100 %, диаметром от 2,8 до 0,5 мм с вероятностью уклонения 90 %, диаметром от 0,2 мм с вероятностью уклонения 46 %. В работе [4] исследовалась помехозащищенность сонара дельфина в условиях поиска подводных объектов на фоне дна и придонных объектов в виде камней различного размера. Показано, что мишень, находящуюся в 30 см от дна, дельфин легко обнаруживал с большого расстояния, а при решении задачи обнаружения на фоне камней диаметром от 5 до 30 см дельфин менял траекторию с вертикального погружения к объекту поиска на

горизонтальное или косое положение тела по отношению к мишени.

В процессе изучения работы сонара дельфина афалины при дифференцировании простых геометрических фигур [5] с использованием разделительной сети показано, что во время принятия решения в условиях усложнения задачи дельфин часто ложился на бок при облучении пространства. В аналогичном эксперименте [6] при усложнении задачи дельфин активно менял угол облучения цели, совершая сканирующие движения головой. В исследовании [7] показана связь между частотой следования импульсов эхолокации со сложностью решения задачи эхолокации. В простых задачах статистически значимого увеличения частоты следования не наблюдалось, однако при усложнении задачи дифференцирования сферических объектов показано увеличение частоты следования импульсов эхолокации. При дифференцировке пары объектов (металлических шаров и цилиндров), предъявляемых параллельно на расстоянии 24 м от животного, происходит сдвиг максимума диаграммы направленности [8, 9], при этом изменений двигательной активности в зависимости от типа мишени не наблюдалось [10].

Большая серия экспериментов при решении дельфином задач обнаружения подводных объектов на различных расстояниях в статическом режиме эхолокации одновременно с двумя животными (последовательное решение им задачи) представлена в работах зарубежных коллег [11, 12]. Полученные данные показали, что дельфин способен обнаруживать объекты, удаленные на расстоянии до 80 м. Средний уровень акустического давления используемых дельфином импульсов составил 220,2 дБ для одного животного и 222 дБ (относительно 1 мкПа, приведенное к 1 м) для другого. Типичные сигналы имели длительность 40 мкс с пиком энергетического спектра в области 120–130 кГц. Интервал задержки T_3 составил 30–50 мс ($T_3 = T_{\text{экс}} - T_{\text{идеал. набл}}$, где $T_{\text{экс}}$ — время между импульсами эхолокации, наблюдаемое в эксперименте; $T_{\text{идеал. набл}} = 2L/C$ — время 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 [13–15] максимальное время между отдельными импульсами составило 150 мс, а спектральный максимум импульсов находился в области 120–130 кГц. Эксперименты по исследованию сонара дельфина при решении задачи обнаружения показали, что дельфин успешно обнаруживает стальную сферу диаметром 10 см на расстоянии 120 м, а уголкового отражателя с силой цели –1,6 дБ обнаруживает на расстоянии до 600 м [16]. В этих экспериментах впервые показано, что дельфин афалины меняет последовательность эхолокационных импульсов и использует при решении задачи обнаружения моноимпульсный и мультиимпульсный режимы эхолокации (излучение пакетов импульсов)

при удалении объекта более 120 м [17]. Наибольшие изменения акустического репертуара наблюдаются у дельфина белухи (*Delphinapterus leucas*) [18].

Таким образом, полученные результаты лабораторных экспериментов по исследованию сонара китообразных в условиях бассейна и в открытой воде показывают разноплановые результаты двигательного и акустического поведения, что связано с различными неучтенными факторами во время проведения опытов, а также с методикой регистрации эхолокационных сигналов и их идентификации к условиям опыта. Неоднозначность результатов измерения сигналов эхолокации, записанных в условиях бассейна, скорее всего, связана с малыми расстояниями между точкой регистрации и дельфином, что приводит к усложнению области максимума амплитуды излучения, так как область освещения пространства ограничивается диаметром пятна характеристики направленности, которая зависит от частоты, а на высоких частотах это пятно минимально.

Разнообразие сигналов эхолокации или его отсутствие может быть связано с излишней фиксацией положения животного во время поиска и ограничением времени поиска. Необходимо точно выделить сигналы, излучаемые экспериментальным животным, и идентифицировать акустическую последовательность с условиями эксперимента. Полученные последовательности акустической эмиссии в дальнейшем обрабатываются для поиска целенаправленной адаптации сонара дельфина к условиям эксперимента.

Цель исследования — изучение организации акустического поведения дельфина *Tursiops truncatus ponticus* и идентификация сигналов эхолокации в условиях лабораторного эксперимента в открытой воде при решении задачи обнаружения подводных объектов, удаленных на различные расстояния.

Методика эксперимента

Для точной идентификации сигналов дельфиное афалин была разработана методика эксперимента, с помощью которой эхолокационная последовательность импульсов точно разделяется на сигналы, излучаемые при наличии объекта поиска или при его отсутствии. Эксперимент построен по методике альтернативного выбора при последовательном предъявлении стимула 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. После получения устойчивого двигательного поведения пищевое подкрепление постепенно убрали. В результате внедрения методики акустического управления поведением без пищевого подкрепления было получено значительное увеличение количества испытаний за один опыт.

Управление поведением животного осуществляется с помощью акустического сигнализатора, генерирующего четыре сигнала с несущей частотой 50 кГц с амплитудной модуляцией: F1 — 500 Гц, F2 — 1 кГц, F3 — 1,5 кГц, F4 — 2 кГц. Элементы двигательного поведения в эксперименте вырабатывались таким образом, чтобы в результате выполнения команды «старт» (F1) дельфин подходил к манипулятору старта с ориентацией положения на поверхности воды под 90° по отношению к сектору обзора. Поскольку дельфин в таком положении не способен сканировать сектор поиска, это будет удобным моментом для изменения условия поиска, т. е. перемещения лодки по дистанции или погружения/поднятия объекта поиска. По команде «поиск» (F2) дельфин разворачивается в сектор поиска и опускается на глубину, необходимую для поиска подводного объекта. Эхолокационные импульсы излучаются животным непрерывно — с выбранной дельфином глубины и до поднятия к поверхности. Дельфину предоставлена полная свобода выбора начала излучения для обследования пространства и момента окончания изучения сектора поиска, при этом время поиска не ограничено. Принятое решение дельфин обозначает нажатием на манипуляторы ответной реакции: воздействие на манипулятор, расположенный справа от сектора обзора, означает, что «объект поиска находится в секторе обзора»; воздействие на манипулятор, расположенный слева от сектора обзора, означает, что «объект поиска отсутствует в секторе обзора».

Совпадение условий опыта и ответной реакции дельфина подтверждается сигналом оператора «задача решена верно» (F3). В случае несовпадения условий опыта и ответной реакции дельфина оператор сигнализирует животному, что «задача решена неверно» (F4). Жесткие акты двигательной активности по акустическим командам во время опыта при отсутствии пищевого подкрепления, а также обмен информацией между оператором и животным практически полностью исключили межсигнальные двигательные акты. Появление межсигнальных реакций свидетельствует о необходимости искать мешающий фактор, который вызывает необъяснимое поведение животного. Такими факторами могут быть: усталость животного, слишком удаленным оказался объект поиска или между дельфином и объектом поиска появилось препятствие, например холодное (теплое) течение.

Схема эксперимента изображена на рис. 2. Дельфин находится в свайно-сетевом вольере, который оборудован специальным окном в бухту. Окно размерами 2×4 м в отличие от сетей вольера перетянута сетью с размерами ячеек 25×25 см. На линии сектора обзора, в 1 м от окна, установлен стартовый манипулятор $M_{ст}$. В 1,5 м слева и справа от стартового манипулятора установлены манипуляторы ответной реакции M_o . От экспериментального вольера перпендикулярно к окну в бухту по линии стартовой позиции натянут трос, вдоль которого перемещается лодка с помощником оператора на борту. У оператора и помощника оператора имеются радиостанции для координации изменения условий опыта. При проведении эксперимента до 250 м лодка перемещается плавно вдоль натянутого троса от платформы с гидрофоном Г2, установленной в 50 м от гидрофона Г1. Гидрофон Г1, установленный в 2 м от вольера, выполняет функцию синхронизации импульсов эхолокации, что позволяет при обработке использовать временную фильтрацию биоакустических данных. При проведении экспериментов на дистанции более 250 м лодка перемещается дискретно по установленным поплавкам на расстоянии 50 м друг от друга с максимальным удалением от вольера до 700 м. Глубина трассы при проведении экспериментов до 250 м составляет 4 м, а при удалении до 700 м глубина трассы около вольера достигает 6 м и далее с уклоном по глубине до 15 м.

В качестве гидрофона использована пьезокерамика диаметром 5 мм, средняя чувствительность которого в полосе до 200 кГц равна 7 мкВ/Па. Гидрофон Г1 установлен в 2 м от вольера, а гидрофон Г2 — на платформе в 50 м от гидрофона Г1. На платформе установлен преусилитель с питанием от аккумулятора. Преусилитель (коэффициент усиления равен 5) соединен с усилителем по кабелю 60 м. Сигнал от гидрофонов Г1 и Г2 через усилитель регистрируется с помощью двухканального широкополосного магнитофона МП-3, который имеет практически линейную характеристику до 200 кГц. Неравномерность амплитудно-частотной характеристики тракта регистрации в полосе 0,5–200 кГц не более 3 дБ. Дальность (50 м) и глубина (в середине слоя воды — 2 м и 3 м) погружения гидрофона Г2 выбраны исходя из того, что спектрально-временные характеристики импульсов эхолокации не изменяются в пределах $\pm 2^\circ$ по уровню 0,7 пространственной характеристики направленности

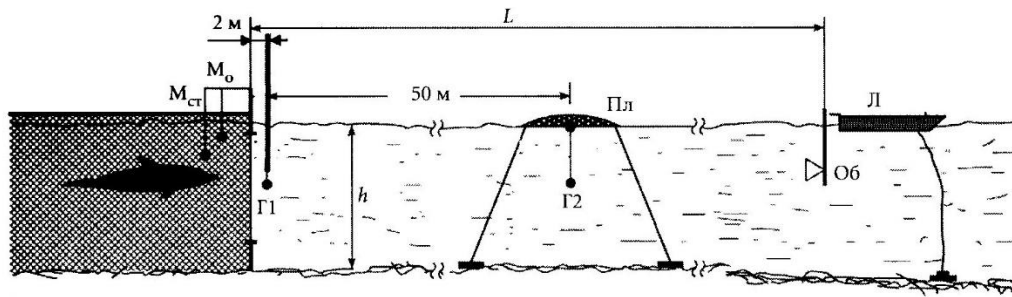


Рис. 2. Схема эксперимента: Г1, Г2 — гидрофоны; Л — лодка; Об — объект поиска; Пл — платформа удаленного гидрофона; $M_{ст}$ — манипулятор старта; M_o — манипуляторы ответной реакции слева и справа от линии сектора обзора; L — расстояние от вольера до объекта поиска; h — глубина бухты

поля излучения. Понятно, что, зная геометрию трассы и глубину погружения животного, можно вычислить по-меху от поверхностной реверберации. Например, при погружении животного 0,5; 1; 1,5; 2; 3 и 3,5 м задержка зеркально отраженного импульса составит 26,6; 53; 80; 106,5; 159 и 186 мкс соответственно. Смещение точки регистрации при ветровых нагрузках относительно диаграммы направленности в горизонтальной плоскости не более $\pm 2,5^\circ$, так как запись проводится при минимальных ветровых нагрузках.

На первом канале записываются сигналы с гидрофона Г1, на втором — с гидрофона Г2. Протокол эксперимента с помощью микрофона фиксируется также на втором канале. Протокол эксперимента содержит основные сведения о каждом испытании: дальность до объекта поиска, глубина погружения объекта, наличие объекта, номер объекта, реакция дельфина.

В качестве объектов поиска в эксперименте использованы: уголкового отражатель со стороной 200 мм (сила цели $-1,6$ дБ); два уголкового отражателя, установленных на расстоянии между центрами 0,5 м [сила цели -0 (1) дБ].

Опыты проводились 2 раза в день, продолжительность каждого опыта примерно 2 ч. Порядок испытаний соответствует таблице случайных чисел с максимальным повторением до четырех подряд одинаковых сюжетов (наличие или отсутствие объекта).

Процедура опыта выглядела следующим образом:

- за 5–10 мин до начала опыта животное приглашали в экспериментальный отсек и слегка подкармливали;
- по акустическому сигналу F1 дельфин занимал стартовую позицию у манипулятора старта $M_{ст}$ на поверхности воды, ориентируясь в направлении 90° от сектора поиска;
- по радиоканалу оператор передавал помощнику информацию о дистанции, расположении лодки, номер объекта поиска и глубину погружения объекта;
- в соответствии с протоколом эксперимента объект погружали в воду или вынимали из воды;
- магнитофон включали на запись и включали сигнал F2 — поиск;
- по сигналу F2 дельфин разворачивался в сектор поиска, погружался на глубину и начинал эхолокацию;
- через 1–6 с после принятия решения животное толкало соответствующий манипулятор (M_0), есть объект или нет;
- по окончании выполнения задания оператор включал сигнал F3, сообщая животному об успешном его выполнении, или сигнал F4, если задание выполнено неверно;
- запись на магнитофон выключается.

Количество испытаний зависело от состояния животного и колебалось от 100 до 200 решений. По окончании опыта животного докармливали, используя игровые сюжеты и тактильный контакт. Такой сценарий пищевого вознаграждения не связан непосредственно с работой дельфина в задаче обнаружения, но является важным этапом поощрения животного за хорошую

работу. Причем непосредственный контакт с человеком иногда бывает важнее, чем пищевое поощрение.

Результаты и обсуждение

Обнаружение подводных объектов на предельных дистанциях зависит от различных факторов: энергетических характеристик излучающей системы, характеристик приемной системы, акустического фона среды, слоистости среды, акустической прозрачности трассы по частоте, психоэмоционального состояния животного, техники обучения животного и методического обеспечения.

Дальность обнаружения подводного объекта с силой цели $-1,6$ дБ составила 500–550 м, а объекта с силой цели -0 (1) дБ — более 600 м.

Для цифровой обработки биоакустической информации записи с магнитного носителя оцифровываются с помощью аналого-цифрового преобразователя с частотой квантования 3 МГц.

Обработка фонограмм показала, что в процессе обнаружения подводных объектов дельфин менял амплитуду эхолокационного сигнала в зависимости от расстояния до объекта поиска. На рис. 3 представлена зависимость изменения уровня звукового давления от дальности до объекта эхолокации. Полученная зависимость построена по средним значениям уровня звукового давления сигнала от пика до пика для всех реализаций отсутствия или наличия объекта поиска. Как видно из представленной зависимости, уровень звукового давления растет практически линейно. Минимальное значение уровня акустического давления составило 190 дБ и на предельных расстояниях достигало 222 дБ. Понятно, что акустическое давление сигналов эхолокации зависит от силы цели и акустической прозрачности среды.

На рис. 4 приведена временная последовательность импульсов эхолокации. Каждая последовательность импульсов представлена всеми сигналами, которые дельфин использовал во время поиска цели. При расстоянии до цели менее 100 м интервал времени между импульсами точно соответствует формуле $T = 2L/C + T_3$ (30–50 мс),

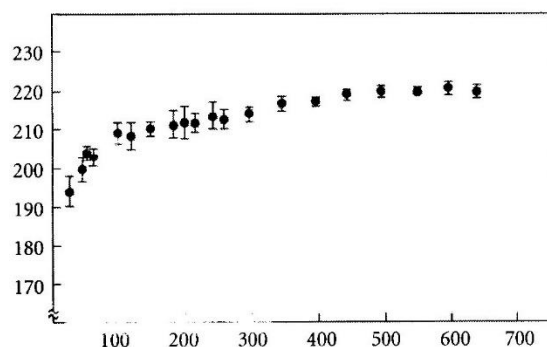
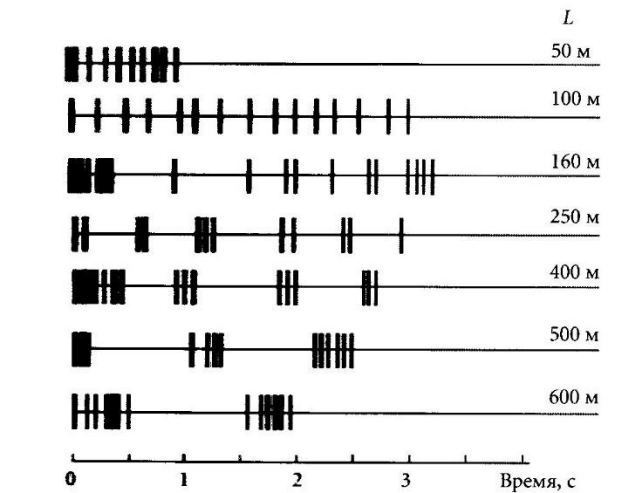


Рис. 3 График зависимости уровня акустического давления от дальности до объекта поиска; по оси ординат — уровень звукового давления (дБ) относительно 1 мкПа, приведенный к 1 м; по оси абсцисс — расстояние до объекта поиска (м)



Полная последовательность эхолокационных сигналов дельфина афалины в семи испытаниях при решении задачи обнаружения подводных объектов на различных дистанциях: L — расстояние от дельфина до объекта поиска

где C — скорость звука в воде; L — расстояние до цели.

При расстоянии до цели более 100 м временная последовательность эхолокационных импульсов не подчиняется приведенной формуле и требует более детальное рассмотрение. Представленные результаты показывают, что дельфин во время решения задачи поиска цели использует два режима эхолокации: моноимпульсный, в котором интервал времени между импульсами подчиняется приведенной формуле, и, для уменьшения многозначности, мультиимпульсный режим эхолокации (рис. 5). При использовании мультиимпульсного режима эхолокации дельфин излучает пакеты импульсов, а интервал между пакетами импульсов подчиняется приведенной формуле.

Идентификация сигналов при проведении эксперимента в открытой воде, когда объект поиска находится на большой дальности от вольтера, а также в присутствии других животных, которые интересуются, чем за-

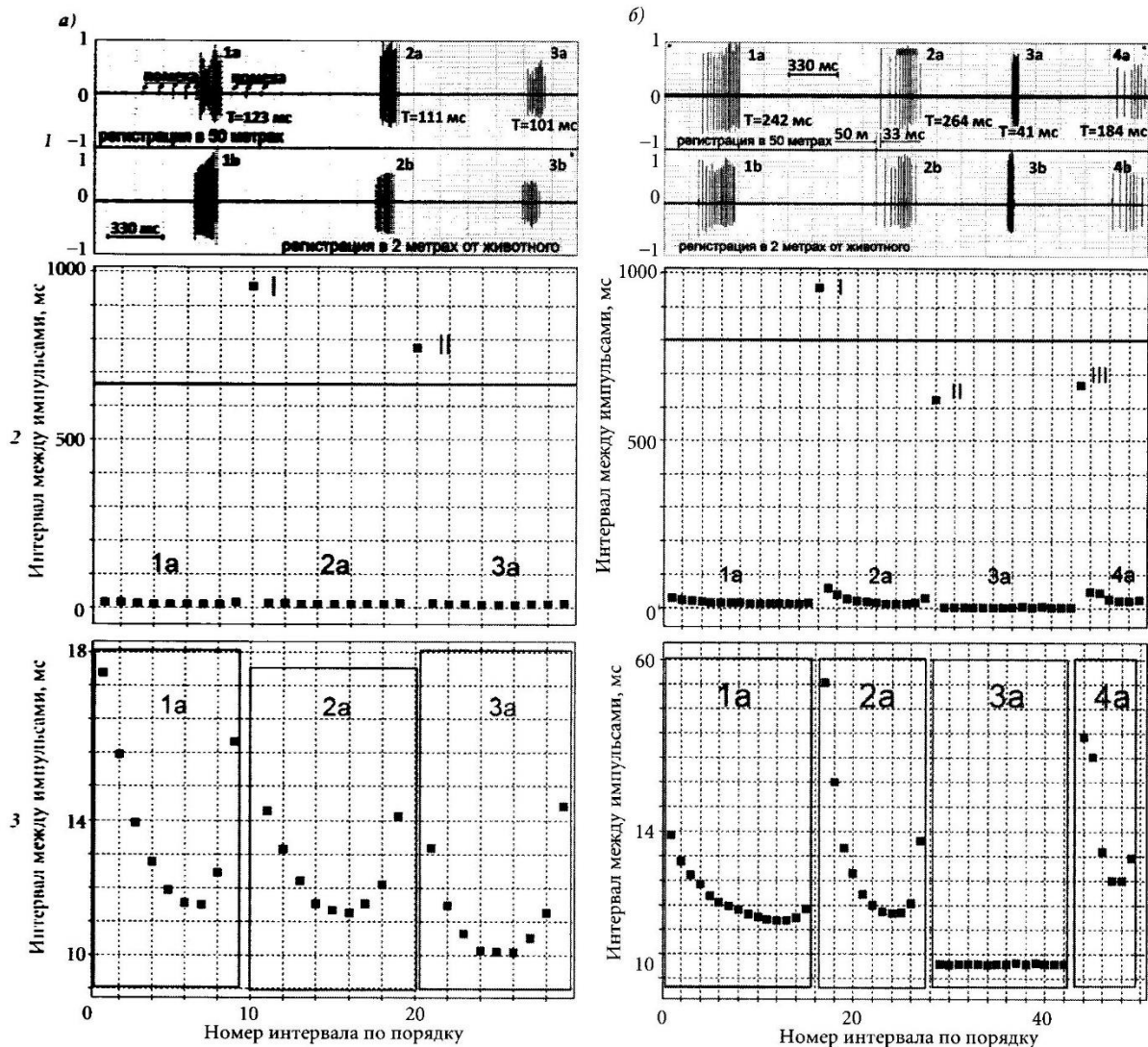


Рис. 5 Полные последовательности эхолокационных импульсов при решении задачи обнаружения; а — поиск цели на расстоянии 50 м, объект есть — реакция правильная; б — поиск цели на расстоянии 600 м, объект есть — реакция правильная; 1 — осциллограмма двухканальной регистрации эхолокационной последовательности; 2 — зависимость интервала между импульсами от дальности до объекта поиска; 3 — интервал между импульсами в пакетах

нимается рядом находящееся животное, задача трудная, но решаемая при условии многоканальной регистрации последовательности импульсов и фильтрации сигналов по времени. Если на одном из каналов количество импульсов больше, чем на другом (рис. 5, а, 1), то это, прежде всего, указывает на то, что лишние импульсы принадлежат другому животному.

Если измерить задержку между эхолокационным импульсом и поверхностной реверберацией и построить графическую зависимость изменения задержки от номера импульса по порядку, то можно легко заметить, что существуют закономерности изменения задержки как внутри пакетов, так и от пакета к пакету. В этом

случае при статичном положении гидрофонов задержка между зондирующим импульсом и поверхностной реверберацией определяет глубину погружения дельфина, причем чем больше задержка, тем глубже находится животное в момент излучения импульса. Задержка является надежным маркером необходимости дальнейшей обработки эхолокационного импульса. Если задержка мала, то дальнейшая обработка зондирующего импульса затруднительна, так как сигнал представляет собой смесь излученного импульса и импульса, отраженного от раздела сред вода—воздух. Отраженный импульс может иметь амплитуду больше, меньше или равную амплитуде излученного импульса, так как амплитуда

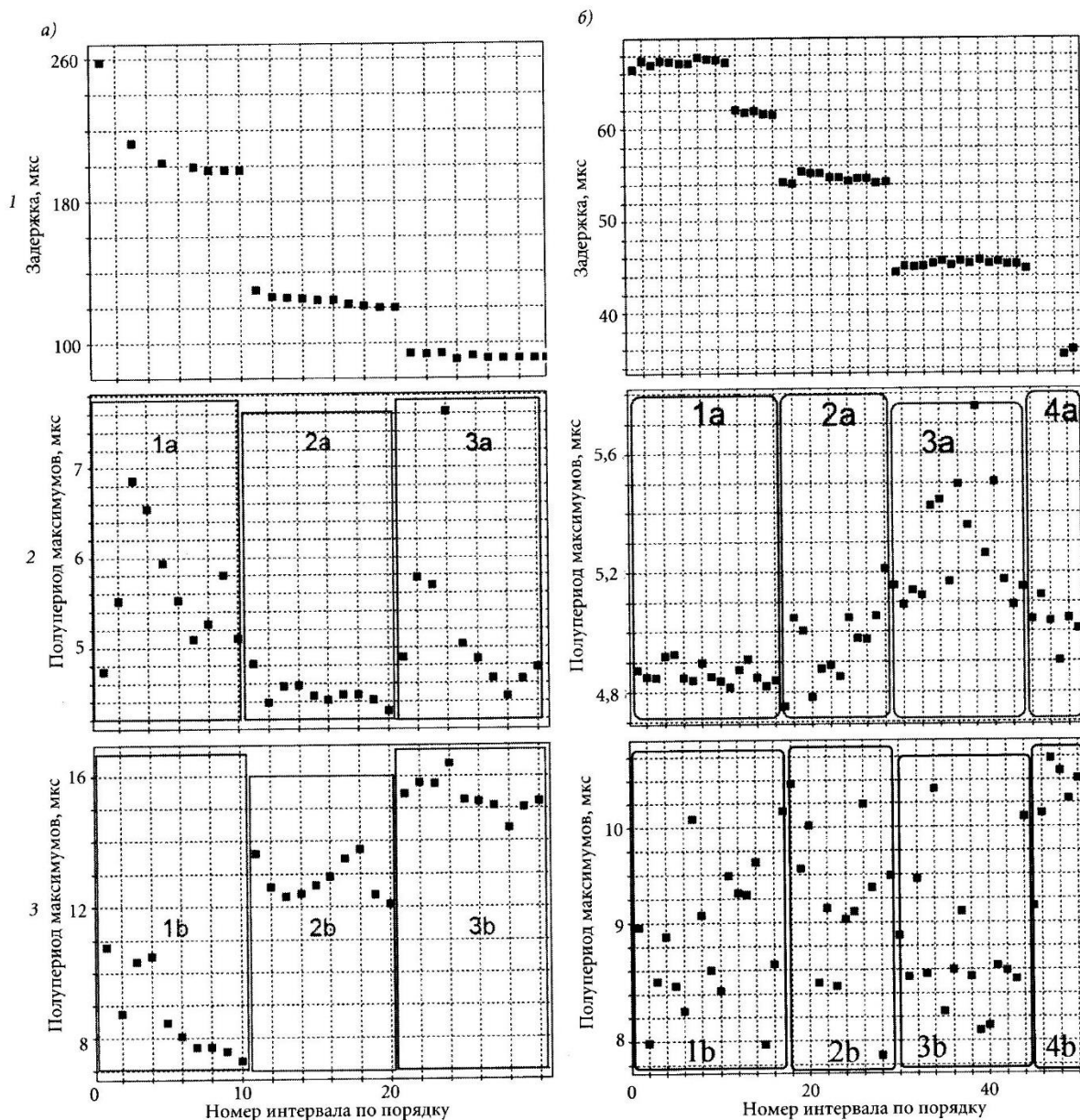
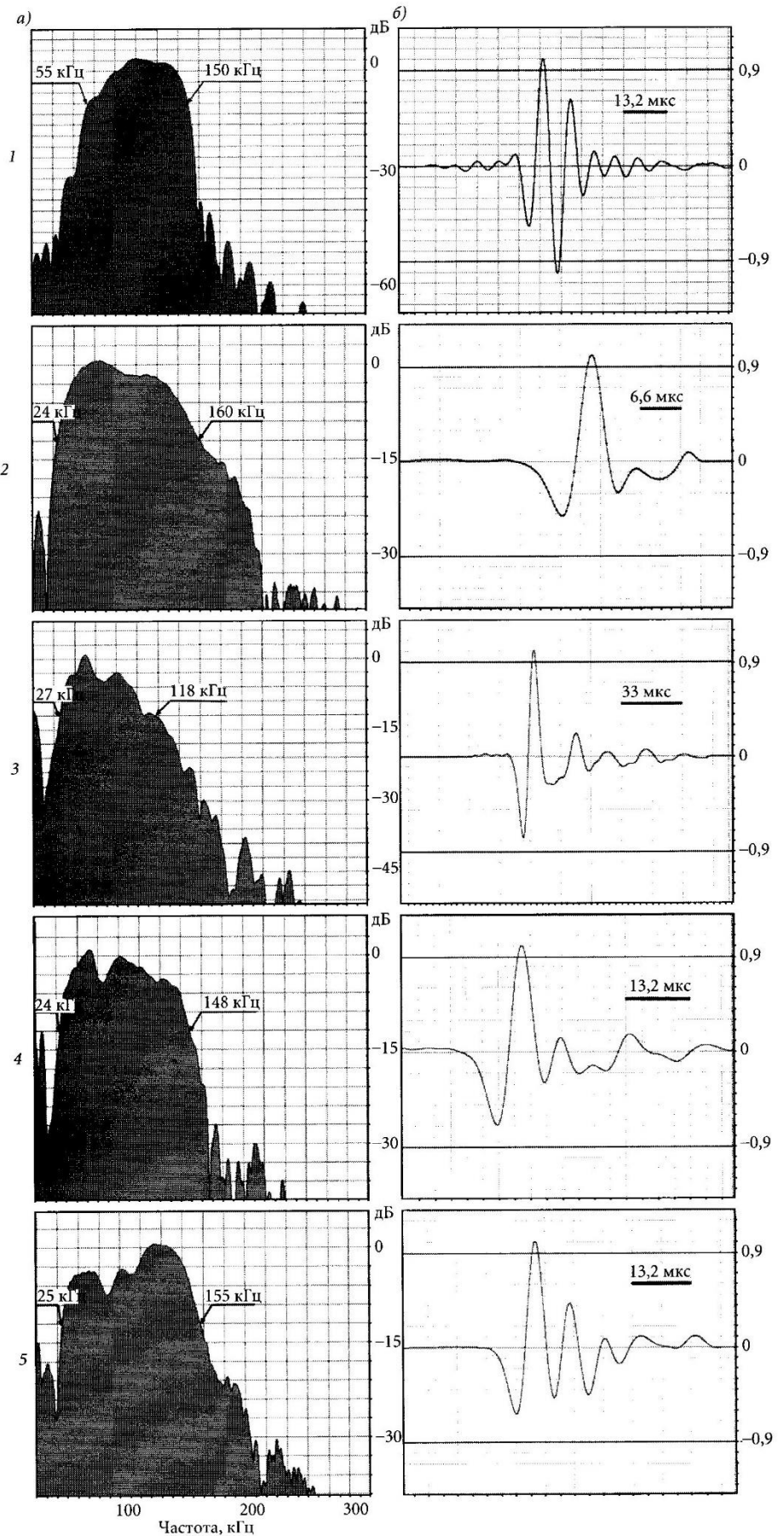


Рис. 6 Временная обработка последовательности эхолокационных импульсов: а — поиск цели на расстоянии 500 м, объект есть — реакция правильная; б — поиск цели на расстоянии 600 м, объект есть — реакция правильная; 1 — задержка между зондирующим импульсом и отраженным от границы сред; 2 — интервал времени между полупериодами максимумов при регистрации сигналов на расстоянии 50 м; 3 — интервал времени между полупериодами максимумов при регистрации на расстоянии 2 м от животного



Спектрально-временные характеристики эхолокационных импульсов дельфина при решении задачи обнаружения на различных дистанциях: а — спектральная плотность; б — осциллограмма

отраженного импульса зависит от угла скольжения поля излучения и направления максимума диаграммы направленности по отношению к точке приема.

Набор маркеров, по которым идентифицируется эхолокационный импульс экспериментального животного среди других возможных сигналов, состоит в следующем: каждый зондирующий импульс имеет импульс-спутник (отражение от границы раздела сред вода—воздух). Расположение импульса-спутника на оси времени относительно зондирующего импульса зависит от глубины погружения животного, глубины погружения гидрофона и расстояния между гидрофоном и дельфином. Каждый такой импульс-спутник обязательно имеет противоположную полярность относительно зондирующего импульса. Спектрально-временная структура реверберационного импульса, так же как и структура зондирующего импульса, зависит от азимута.

Зондирующий импульс дельфина, как правило, биполярный с переменной спектрально-временной структурой, поэтому сравнение зондирующих импульсов между собой по спектрально-временным параметрам — длительный и сложный процесс. Поэтому для простоты сравнения импульсов между собой возьмем показатель длительности между экстремумами основного колебательного процесса или полупериод максимумов. На рис. 6, а, 2 и 6, б, 2 представлены графики изменения длительности между экстремумами в зависимости от номера импульса по порядку, записанные в дальней (50 м) и ближней (2 м) точках регистрации сигналов животного (рис. 6, а, 3 и 6, б, 3). Из представленных графиков видно, что самый короткий интервал для знакопеременного импульса составляет 4,2 мкс при обнаружении объекта, удаленного на 500 м. Самый короткий интервал при поиске цели на расстоянии 600 м составляет 4,75 мкс. Конечно, набирать статистику длительности волнового процесса по измерению длительности полупериода максимумов необходимо, но надо понимать, что количество импульсов с минимальным показателем (4,2 мкс или менее) будет наименьшим, так как площадь освещения пространства таким коротким, а соответственно и высокочастотным импульсом самая минимальная. Именно поэтому использовать математическую статистику для идентификации импульсов эхолокации необходимо с большой осторожностью. Особенно это заметно при сравнении полупериодов максимума (рис. 6, б, 2 и 6, б, 3). При регистрации удаленной точки в каждом пакете импульсов длительность полупериода максимумов меняется на 1 мкс (от 4,75 до 5,75 мкс), в то время как полупериод максимума при регистрации в 2 м от животного меняется от 7,9 до 10,4 мкс. Много или мало 1 мкс? Подсчитаем по формуле $T_{\text{длит. имп}} = 2T_{\text{между экстр}}$ в частотной области пространства максимум $A_{\text{max}} = 1/T_{\text{длит. имп}}$. Для примера $3 \cdot 2 = 6$ мкс, $A_{\text{max}} = 166$ кГц; $4 \cdot 2 = 8$ мкс, $A = 125$ кГц; $5 \cdot 2 = 10$ мкс, $A = 100$ кГц, т. е. изменение импульса длительностью 4 мкс на ± 1 мкс приводит к изменению в частотной области приблизительно на 25 кГц. Если регистрация на большом расстоянии приводит к более или менее стабильным импульсам, как, например,

в первом пакете $4,85 \pm 0,05$ мкс (или в частотной области 103 ± 1 кГц), то импульсы при регистрации вблизи демонстрируют не только большой разброс, но и практически случайное изменение длительности между экстремумами (рис. 6, б, 3).

Спектрально-временные характеристики эхолокационных импульсов дельфина афалины при решении задачи обнаружения подводных объектов на различных дистанциях представлены на рис. 7. На осциллограмме видно некоторое разнообразие временной структуры и изменение формы сигнала. Сигналы взяты из биоакустических фрагментов различных испытаний при изменении расстояния (350, 400, 500, 600 и 650 м) между дельфином и целью. На рис. 7, 2–4 импульсы имеют некоторое сходство с однопериодным сигналом биполярной структуры с частотной полосой 100–120 кГц по уровню 12 дБ от максимума.

Импульсы 1 и 5 на рис. 7 имеют несколько периодов затухающих колебаний, при этом импульсы широкополосные. Основной лепесток энергетического спектра ограничен 200 кГц, с полосой частот основного максимума 100–130 кГц по уровню 12 дБ. Различение сигналов по спектральным составляющим затруднительно независимо от дальности до объекта поиска или силы цели.

Существует некоторая тенденция к увеличению длительности за счет затухания колебательного процесса по экспоненте, но это требует более подробных исследований и доказательств с использованием биоакустических записей от трех-пяти животных.

Выводы

В результате исследований определены некоторые возможности сонара дельфина при решении задачи обнаружения подводных объектов на различных дистанциях. Эксперименты проведены в статическом режиме эхолокационного поиска при альтернативном выборе условий работы в открытой воде. В процессе адаптации к сложным условиям поиска объектов на мелководье на больших дистанциях экспериментально показано, что дельфин при поиске цели до 120 м работает в монс импульсном режиме эхолокации. При увеличении дальности более 120 м дельфин использует режим излучения пакетов импульсов. Пакеты импульсов состоят из двух и более импульсов. Длительность пакета, количество импульсов в пакетах, количество пакетов зависят от дальности до объекта поиска. Количество излученных пакетов зависит от акустической обстановки и сил цели. Иначе для решения задачи поиска дельфину достаточно одного пакета, а при отсутствии объекта поиска дельфин излучает до 20 и более пакетов. Аналогичные результаты получены в работе зарубежных коллег в эксперименте по имитации удаления цели с помощью фантомного эха [21].

Регистрация с помощью двух каналов дает возможность идентифицировать зарегистрированные сигналы с дельфином, который выполняет задачу поиска. В ра

ные параметры основные маркеры идентификации сигнала — длительность интервала между импульсами, интервал между пакетами импульсов, длительность пакетов, интервал между пакетами импульсов, изменение закона ритма импульсной модуляции в пакетах импульсов, наличие задержки реверберации, изменение длительности между экстремумами, количество импульсов в последовательности сигналов, количество импульсов по пакетам, количество импульсов в пакетах, плавность изменения временных показателей от импульса к импульсу. Перечисленные показатели позволяют автоматизировать процесс идентификации сигналов. При решении задачи использования дельфинов в биотехнических системах необходимо иметь больше двух каналов регистрации биоакустической активности, так как помеховая обстановка может измениться неожиданно из-за присутствия на полигоне или охраняемой территории других животных.

Спектральный состав эхолокационных импульсов вряд ли может служить идентификационным признаком, поскольку спектральные параметры сигналов эхолокации зависят от азимута, а поместить приемник в зоне максимума диаграммы направленности — задача практически нерешаемая.

Идентификация эхолокационных сигналов по времени с помощью количественных маркеров позволяет идентифицировать излучаемые пакеты зондирующих сигналов с рабочим дельфином независимо от азимута, так как эти показатели не зависят от пространственных характеристик поля излучения. Интервал времени между пакетами может служить показателем примерной дальности до объекта поиска. При автоматизации работы охранной биотехнической системы акустические показатели необходимы для расчета дальности до объекта поиска, а характер пространственной изменчивости спектрально-временных параметров эхолокационных импульсов может служить азимутом или направлением на объект. В этом случае ВИМ позволяет идентифицировать импульсы рабочего животного в динамике, а динамика изменения окраски импульсов по известному закону модуляции дает возможность определить направление на цель.

Максимальный уровень акустического давления составляет 222 дБ относительно 1 Па, приведенного к 1 м. Этот показатель не является информационным параметром для эхолокационных импульсов, но не исключено, что он может сыграть важную роль при оценке составных сигналов (ЧМ + пакеты с ВИМ). Пока такие сигналы при решении задачи не обнаружены, но не исключено, что если рабочих животных будет больше одного, они будут решать одновременно одну и ту же задачу, что нечто подобное будет вполне заметно, так как необходимо будет решать задачу совместимости сигналов в сложных акустических условиях сосредоточенных помех (см. рис. 1).

В настоящее время трудно сказать об информативности широкополосного импульса, поскольку один импульс является простым сигналом, который имеет толь-

ко одну степень свободы — амплитуду. Использует ли этот показатель дельфин, пока неясно, но можно предположить, что амплитудная модуляция последовательности коротких импульсов вполне возможна, но это уже будет сложный сигнал.

Литература

1. Акопиан А. И. Исследование закономерностей изменения частоты следования эхолокационных сигналов дельфина *Tursiops truncatus*: дис. ... канд. биол. наук. 1995.
2. Белькович В. М., Хахалкина Э. Н. Этолого-акустические корреляты черноморской афалины // Черноморская афалина (*Tursiops truncatus ponticus*) / Под ред. В. Е. Соколова и Е. В. Романенко. М., 1997. С. 513–543.
3. Busnel R. G. Resultats metrologique experimentaux de d'echolocation chez le Phocaena phocaena et leur comparaison avec ceuz de certaines chauve-souris // In: Animal sonar systems. Biology and bionics / Ed. by R. G. Busnel. Joyen-Josas, 1967. P. 307–335.
4. Титов А. А. Исследование звуковой активности и феноменологических характеристик эхолокационного анализатора черноморских дельфинов: дис. ... канд. биол. наук. Карадаг, 1972.
5. Вельмин В. А. Обнаружение афалиной мишени в условиях искусственной реверберации // Морские млекопитающие. Материалы 6-го Всесоюз. совещания по изучению морских млекопитающих. Киев: Наук. думка, 1975. Ч. 1. С. 75–77.
6. Дубровский Н. А., Краснов П. С. Распознавание дельфином афалиной упругих шаров по материалу и размеру // Тр. акуст. ин-та. 1971. Вып. 17. С. 9–18.
7. Гиро Л. З. О зависимости частоты следования эхолокационных сигналов дельфинов от сложности эхолокационной задачи // Морское приборостроение. Сер. Акустика. 1972. Вып. 2. С. 84–94.
8. Изменение локационных сигналов дельфинов в процессе дифференцирования сферических и цилиндрических мишеней / Э. Ш. Айрапетьянц, Б. Ф. Сергеев, Ю. В. Иваненко [и др.] // Тез. докл. V Всесоюз. совещания по изучению морских млекопитающих. Махачкала, 1972. Ч. 2. С. 234.
9. К физиологии сонарной системы черноморских дельфинов / Э. Ш. Айрапетьянц, Б. Ф. Сергеев, Ю. В. Иваненко [и др.] // Журнал эволюционной физиологии и биохимии. 1973, Вып. 2. С. 418–421.
10. Иванов М. П., Курганский Н. А. Траектория движения дельфина в процессе распознавания сферических и цилиндрических мишеней // Материалы Всесоюз. совещания по бионике. М., 1973. С. 54.
11. Measurement of echolocation signals of the Atlantic bottlenose dolphin *Tursiops truncatus* Montagu in open water / W. W. L. Au, R. W. Floyd, R. H. Penner, A. E. Murchison // Journ. Acoust. Soc. Am. 1974. Vol. 56, N 4. P. 1280–1290.
12. Au W. W. L., Floyd R. W., Haun J. E. Propagation of Atlantic Bottlenose Dolphin Echolocation Signals // Journ. Acoust. Soc. Am. 1974. Vol. 64, N 4. P. 441–422.
13. Au W. W. L., and Penner R. H. Target Detection in Open Waters by an Echolocation Atlantic Bottlenose Dolphin (*Tursiops truncatus*) // Journ. Acoust. Soc. Am. 1974. Vol. 68, N 4. P. 1077–1084.
14. Au W. W. L., Schusterman R. J., Kersting D. A. Sphere cylinder discrimination via echolocation by *Tursiops truncatus* // Animal Sonar Systems, edited by R. G. Busnel and J. F. Fish (Plenum, New York), 1980. S. 859–862.
15. Au W. W. L., Penner R. H. Detection in a Noise by Atlantic Bottlenose Dolphin // Journ. Acoust. Soc. Am. 1981. Vol. 70, N 6. P. 687–693.

16. **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 Всесоюз. совещания (Симферополь, сент. 1978). М., 1978. С. 141–142.
17. **Ivanov M.** Dolphin acoustic behavior during the detection of underwater targets in various acoustic conditions // P085.05. XXXII International congress of physiological sciences, St. Petersburg. 1977. June 30–July 5.
18. **Turl C. W., Penner R. H.** Differences in echolocation click patterns of the beluga (*Delphinapterus leucas*) and the bottlenose dolphin (*Tursiops truncatus*) // Journ. Acoust. Soc. Am. 1989. Vol. 86 N 2. P. 497–502.
19. **Бардин К. В.** Проблемы порогов чувствительности и психофизические методы. М.: Наука, 1976. С. 394.
20. **Иванов М. П.** Эхолокационные сигналы дельфина при решении задач в сложных акустических условиях // Акустический журн. 2004. Т. 50, № 4. С. 550–561.
21. Moore Jittered echo-delay resolution in bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*) / James J. Finneran, Ryan Jones, Jason Mulsow [et al.] // Journ. of Comparative Physiology A. Received 1 July, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00359-018-1309-6>