

УДК 681.519

**ЗАЙЦЕВА КИРА АЛЕКСАНДРОВНА,  
КОРОЛЕВ ВАЛЕНТИН ИВАНОВИЧ,  
АХИ АНДРЕЙ ВАЛЕНТИНОВИЧ,  
БУТЫРСКИЙ ЕВГЕНИЙ ЮРЬЕВИЧ**

## К ВОПРОСУ О МЕХАНИЗМАХ ЛОКАЦИОННОГО ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ОБЪЕКТА ДЕЛЬФИНОМ \*

### АННОТАЦИЯ

Проведенное исследование особенностей локационного обнаружения черноморскими дельфинами афалинами *Tursiops truncatus* подвижных гидролокационных целей свидетельствует о том, что биосонар в зависимости от стоящей перед ним задачи может целенаправленно изменять структуру зондирующего сигнала. Впервые экспериментально показано, что при измерении постоянной скорости животное излучает двухимпульсный зондирующий сигнал, для измерения ускорений – трехимпульсный, что дает существенное преимущество перед одиночным импульсом, так как возможно одновременное измерение параметров движения и расстояния.

**Ключевые слова:** дельфин; локационный сигнал; скорость; ускорение.

**ZAYTSEVA K. A.,  
KOROLEV V. I.,  
AKHI A. V.,  
BUTYRSKIY E. YU.**

## ON DOLPHIN`S MECHANISMS FOR LOCATING MEASUREMENT OF OBJECT`S MOVEMENT VELOCITY PARAMETERS

### ABSTRACT

The performed study of peculiarities of echo-detection of moving underwater targets by the Black Sea bottlenosed dolphins (*Tursiops truncatus*) suggests that the biosonar can purposefully change the structure of its probe signal, depending on the problem to be solved. It was shown experimentally for the first time that the animal emits the two- pulse probe signal to measure the constant velocity, while the three-pulse one, to measure acceleration. The provides an essential advantage over the single pulse, as it becomes possible to measure simultaneously parameters of the movement and distance.

**Keywords:** dolphin; location signal; velocity; acceleration.

### Введение

Современный Военно-морской флот одна из важнейших составляющих вооруженных сил ведущих стран мира. Это определяется многими факторами: высокая мобильность, скрытность подводных лодок, несущих ядерное оружие;

высокая концентрация разнообразного оружия; возможность нанесения удара не только по надводным, но и наземным целям; широкие возможности использования «силовой» дипломатии далеко от собственных границ и т.д. Применение оружия по вероятному противнику, во многом

\* Работа была выполнена в Институте эволюционной физиологии и биохимии им. И.М. Сеченова РАН в рамках государственного задания. Тема ПФНИГ АН-63. Пер. АААА-А18-1180130902245-6.

определяется радиоэлектронным вооружением и, в частности, гидроакустическими средствами. Несмотря на технологический скачок, который произошел в последние 10–15 лет, эффективность гидроакустических средств повысилась незначительно, в отличие от радиолокации. Это связано, прежде всего с тем, что океаническая среда как канал, гораздо более динамичная по отношению к гидроакустическим воздействиям, чем атмосферный к электромагнитным колебаниям. Поэтому на время прохождения электромагнитного сигнала через атмосферный канал, его можно считать «замороженным» (свойства среды не меняются). Для акустических волн это не всегда имеет место. Кроме того, помехи и шумы в гидроакустики носят гораздо более разнообразный характер. Как итог, несмотря на разнообразие алгоритмов обработки, которые являются эффективными в радиолокации, применение их в гидроакустике не всегда приносит положительный результат.

В связи с вышесказанным, можно утверждать, что, хотя принципы функционирования гидроакустических и радиолокационных средств во многом совпадают, специфика гидроакустического канала, низкая скорость распространения акустических колебаний ( $\sim 1500$  м/с) по сравнению с электромагнитными ( $\sim 300\,000$  км/с), сравнительно небольшой интервал когерентности ( $\sim 120 \div 300$  длин волн излучаемого сигнала), необходимо искать новые подходы к обработке гидроакустических сигналов. Поэтому в последние годы вновь резко возросло внимание ученых к изучению принципов работы биологического сонара морских животных, в частности, дельфинов. Изучение механизма работы биологического сонара позволит построить его математическую модель, которая может быть реализована на современной технологической базе. Примеры есть. Искусственная нейронная сеть сделала революцию в обработке информации. Хотя искусственный нейрон очень приближенное представление о тех процессах, которые проходят в биологическом нейроне, но даже такое представление дало ошеломляющий эффект. Нечто подобное, ожидается от искусственной модели биологического локатора.

Настоящая статья является продолжением серии публикаций, посвященных изучению биологического сонара дельфина, результатам экспе-

риментов и математическим моделям излучаемых сигналов. В статье рассматриваются вопросы, связанные с возможностью дельфина определять динамические характеристики подводных объектов: скорость и ускорение.

#### **Возможности сонара дельфина *Tursiops truncatus* по оценке динамических характеристик целей**

В современной литературе практически нет экспериментальных работ, посвященных изучению закономерностей работы локационной системы дельфина при обнаружении и распознавании движущихся целей. Существует лишь несколько теоретических работ [1–8], в которых авторы рассматривают возможность использования доплеровского эффекта, смещения частоты отраженного импульса относительно излучаемого, как способа определения морскими лоцирующими животными скорости движения объекта. Исходя из знания характеристик локационного сигнала дельфинов и используя функцию неопределенности для различных значений доплеровского сдвига частоты эхосигнала, авторы указанных работ математически вычисляли потенциальные возможности сонара лоцирующих животных при измерении ими скорости движущейся цели. Так, Дубровский [4] теоретически рассчитал разрешающую способность биосонара дельфина по скорости с использованием доплеровского фактора и функций неопределенности. Расчетная величина разрешения по скорости для высокочастотной составляющей локационного сигнала афалины составила 30 м/с, а для низкочастотной 20 м/с. Эти данные говорят о практической неприменимости эффекта Доплера для различения дельфином малых скоростей движения цели. Авторы работы [5] также высказывают предположение о возможности применения дельфином эффекта Доплера для восприятия и оценки скорости движения. Необходимым условием для этого авторы считают применение в целях локации высокочастотных сигналов достаточной длительности и способность приемной системы проводить тонкий частотный анализ отраженных эхосигналов. В качестве примера приведены данные для морской свиньи *Phocaena phocaena*, слуховая система которой имеет наименьший дифференциальный порог

по частоте [5]. Оказалось, что потенциальная точность измерения скорости у этих животных может составлять 1 м/с. При этом локационные импульсы морской свиньи частотой 140÷150 кГц должны иметь длительность не менее 5 мс, что намного больше длительностей импульсов, зарегистрированных у дельфинов.

В наших экспериментальных работах [10,11], посвященных исследованию локационных возможностей сонара дельфинов по оценке динамических характеристик подвижных целей, были получены данные, свидетельствующие о том, что эти морские млекопитающие способны измерять такие малые скорости движения цели, как 2 см/с и ускорения 0.84 см/с<sup>2</sup>. Полученные данные ставят под сомнение возможность оценки дельфинами скорости и ускорения подвижных объектов по доплеровскому сдвигу частоты отраженного импульса. Если рассчитать величину доплеровского сдвига для предельных скоростей, наблюдаемых у дельфина при свободном плавании, то для частоты 100 кГц, на которой регистрируется максимум энергии зондирующего импульса, получим величину, равную 700 Гц. Сопоставив эту величину с дифференциальным порогом слуха по частоте в этой области (1038 Гц) [12], мы получим результат не в пользу возможности применения дельфином такого способа определения скорости подвижного объекта. Значения дифференциального порога по частоте в диапазоне 0.9÷90 кГц [12] свидетельствуют о возможности распознавания сонаром дельфина на основе одиночного импульса лишь цели, скорость движения которой превышает величину 6.5 м/с [10]. Таким образом, характер структуры излучаемых дельфинами одиночных зондирую-

щих импульсов [9], а также способность измерения малых скоростей и ускорений движения цели свидетельствуют о невозможности использования дельфинами частотного сдвига отраженного эха как способа оценки скорости и ускорения подвижной цели. Возможно, что дельфины при оценке динамических характеристик подвижных целей применяют не один зондирующий импульс, а их последовательность.

В настоящей работе, являющейся развитием предыдущих исследований, была поставлена задача экспериментального изучения типов излучаемых дельфином сигналов в момент определения скоростей и ускорений подвижных целей и возможности адаптации сонара дельфина при измерении различных динамических характеристик гидролокационной цели.

### Материалы и методы

Для решения поставленной задачи дельфина *Tursiops truncatus* обучали по условно-рефлекторной методике распознавать две возможные ситуации в динамике движения предъявляемой мишени:

- 1) равномерное движение погруженной в воду мишени с постоянной скоростью  $V = 6 \text{ м/с}$ ;
- 2) движение погруженной в воду мишени с ускорением  $2 \text{ м/с}^2$ .

В качестве мишени использовали полый дюралюминиевый шар диаметром 100 мм, заполненный водой. Схема проведения эксперимента представлена на рис.1 с указанием расположения системы блоков ( $B_1, B_2$ ), двигателя ( $D$ ), мишени ( $M$ ), гидрофонов ( $\Gamma_1, \Gamma_2$ ), катера на якорь ( $K$ ) и животного ( $Ж$ ) в стартовой позиции. Была произведена запись локационных сигналов дельфина.

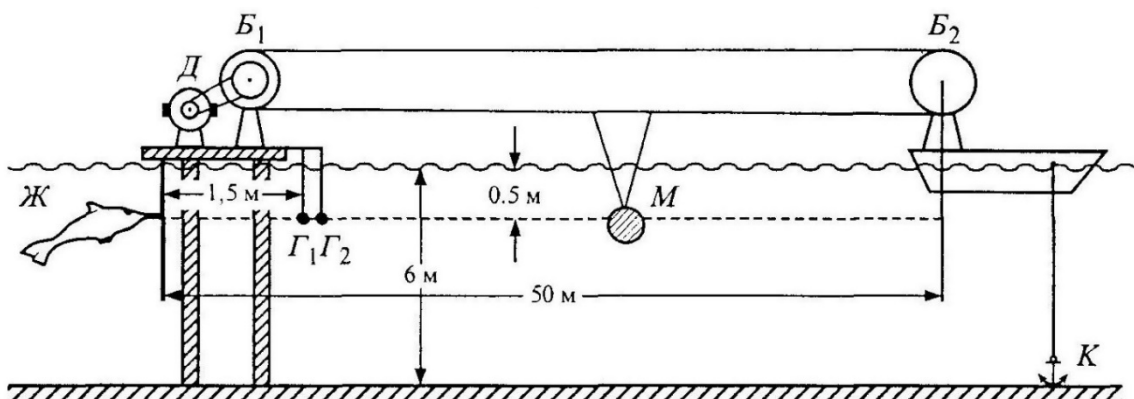


Рисунок 1 – Схема установки для проведения эксперимента

Исследования проводили в свайно-сетевом вольере открытой бухты моря в летний период. Глубина акватории в районе проведения эксперимента составляла 6 м. Запись сигналов осуществляли при волнении моря менее 1 балла и при отсутствии в бухте посторонних издающих шум объектов. Приемный гидрофон обеспечивал равномерность амплитудно-частотной характеристики не более 3 дБ в полосе 0.5-200 кГц. Сигналы через усилитель подавались на АЦП и персональный компьютер для записи и последующей обработки.

В ходе подготовке эксперимента катер ставили на якорь, устанавливали в вольере систему блоков, мишеней, настраивали работу акустического стенда. По условному звуковому сигналу ( $f = 12$  кГц) животное ныряло на глубину 0.5 м и помещало свой рострум в установленный на этой глубине «станок». Такое положение животного являлось стартовой позицией для начала работы. После выключения звукового сигнала мишень приводилась в движение с постоянной скоростью или с ускорением. Если мишень двигалась с ускорением, то животное выходило из станка и ударяло рострумом манипулятор. В случае движения мишени с постоянной скоростью животное должно было оставаться на месте. Контрольное время пребывания в станке составляло 30 с. Каждое правильное движение животного сопровождали пищевым (рыба) подкреплением.

Во время проведения экспериментов фиксировали конкретную динамику движения мишени (величина скорости, направление движения), правильность реакции животного. После достижения устойчивой условно-рефлекторной реакции на динамику движения мишени осуществляли запись локационных сигналов дельфина.

Всего за период исследований было записано по 100 локационных сигналов дельфина на каждое значение динамики движения цели - скорости или ускорения в условиях приближения или удаления цели. Записи сигналов производили в момент правильной оценки животным характера движения предъявляемой мишени в течение 5÷10 с.

На рис. 2 скорость движения 6 м/с. Движение мишени по отношению к дельфину: *а* – приближается, *б* – удаляется. *Вверху* – запись сигналов (шкала времени с шагом 50 мс), *внизу* – развертка сигналов *Д, Б, В* (движение ленты в 4 раза медлен-

нее, чем *вверху*). *I, II* – первый, второй импульсы в сигнале.

На рис.3 ускорение 2 м/с<sup>2</sup>, *а, б, вверху, внизу* – как на рис. 3 (*внизу* – движение ленты в 3 раза медленнее, чем *вверху*). *I, II, III* – первый, второй, третий импульсы в сигнале.

### Результаты и обсуждение

Анализ полученных временных характеристик локационных сигналов дельфина, соответствующих различным условиям движения цели, показал, что в том случае, когда мишень движется (независимо от характера движения), животное излучает серии сложных сигналов, временные параметры и форма которых в серии от сигнала к сигналу практически не изменяются. При всех условиях движения цели наблюдаются изменения в динамике следования локационных сигналов.

Частота их следования плавно нарастает за время предъявления движущейся мишени от 8 до 80 Гц, что соответствует периоду следования  $T_c = 0.125 \div 0.0125$  с при сближении с целью. Можно предположить, что дельфин в процессе определения и уточнения расстояния до цели как бы изменяет «шкалу дальности» своего сонара до оптимальной (минимально необходимой) от 200 до 20 м.

При этом в случае удаления мишени от дельфина максимальная частота следования локационных сигналов в конце предъявления мишени, когда цель находится ближе к катеру, составляла 30 Гц ( $T_c = 0.033$  с), что (соответствует «шкале дальности» 50 м и хорошо согласуется с условиями проведения эксперимента. Направление движения мишени (ее приближение или удаление от животного) и величина постоянной скорости движения мишени не оказывали существенного влияния на временные параметры отдельных посылок локационных сигналов.

Значительное влияние на характер временных локационных сигналов оказывал характер движения мишени (равномерное или ускоренное). Временные параметры сигналов в случае равномерного движения цели приведены на рис. 2 *а, б*, в случае ускоренного движения – на рис. 3 *а, б*.

Как показывает временной анализ, при движении мишени с постоянной скоростью животное использует в качестве отдельных посылок сложный, состоящий из двух коротких высокочастотных

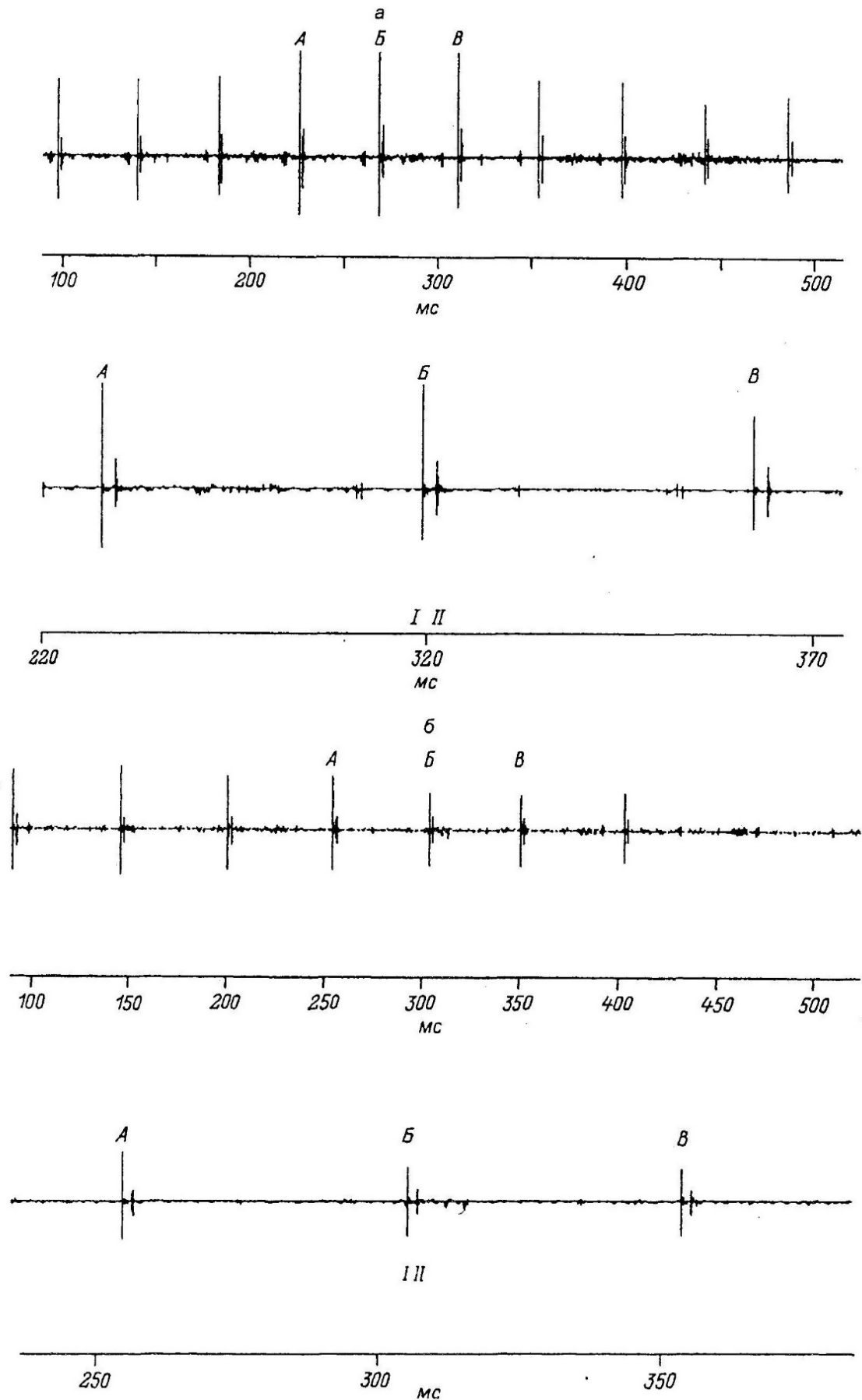


Рисунок 2 – Двухимпульсная структура локационного сигнала афалины, излучаемого животным при измерении постоянной скорости движения мишени

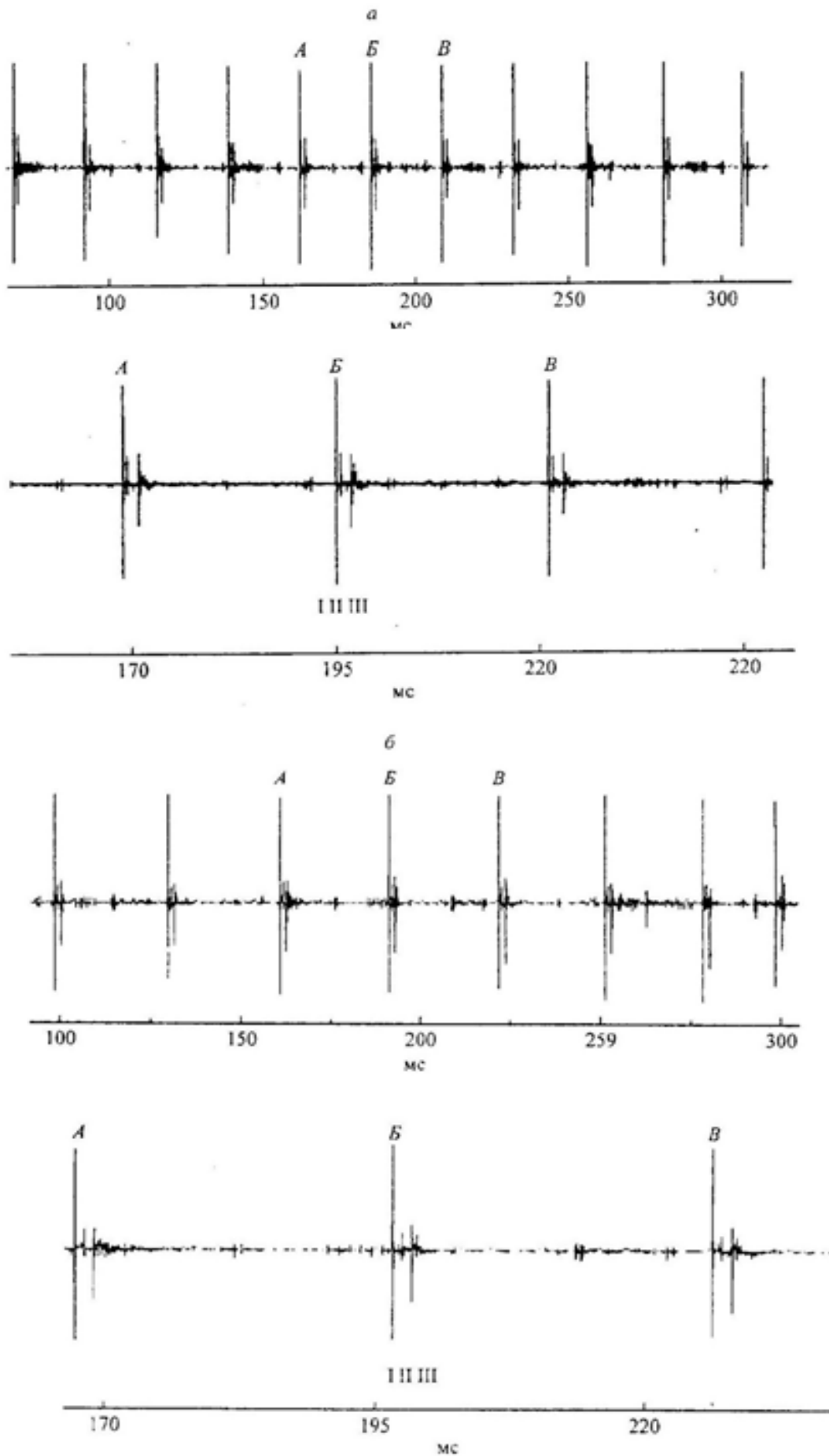


Рисунок 3 – Трехимпульсная структура локационного сигнала афалины, излучаемого животным при измерении ускорений движущейся мишени.

импульсов, локационный сигнал. Временные интервалы между импульсами I и II составляют 1.8 мс и практически не изменяются в серии сигналов на протяжении всей записи. Амплитуда импульса II меньше амплитуды импульса I и составляет величину  $0.3 \div 0.4$  относительно первого. Длительность импульсов  $30 \div 60$  мкс. После приема основного импульсного сигнала гидрофон может принять многочисленные отражения этого сигнала как от поверхности воды, так и возможные отражения от ближайших объектов.

Эти мешающие сигналы могут оказаться вблизи регистрируемого сигнала. Поскольку в наших экспериментах расстояние между источником излучения и приемником 1.5 м, а глубина погружения животного и точки приема 0.5 м, то отраженный импульс мог бы находиться на оси времени от переднего фронта основного импульса лишь менее 1.3 мс.

При ускоренном движении мишени животное применяло серии из более сложных локационных сигналов, состоящих из трех коротких высокочастотных импульсов. Временной интервал между крайними импульсами (на рис. 3 б – I и III) в одной посылке составляет, как в случае движения с постоянной скоростью, 1.8 мс. Но появляется еще один импульс (на рис. 3 б – II) слабее импульсов I и III и отстоящий от импульса I на временной интервал около  $0.5 \div 0.9$  мс и от импульса III примерно на  $0.5 \div 1.3$  мс. Все временные параметры трехимпульсных сигналов также относительно стабильны на протяжении всей серии. Трехимпульсный состав этих сигналов говорит о том, что соотношение чисел (в данном случае величин интервалов между высокочастотными импульсами в одной посылке) позволяет животному определять с достаточной точностью и стабильностью ускорение цели.

Полученные результаты могут быть использованы в теории гидролокации для условий со сложной кинематикой целей и носителей гидролокационных систем и учтены при синтезе зондирующих сигналов с требуемой функцией неопределенности, позволяющих определить скорость и ускорение гидролокационной цели, а также оптимизировать обработку широкополосных сигналов в гидролокационных системах.

Таким образом, все вышесказанное свидетельствует о том, что непосредственное измерение

доплеровского сдвига в частотной области, что реализуется, как правило, все современные гидроакустические средства дельфином не осуществляется. Эксперименты показывают, что с очень высокой вероятностью дельфин реализует принцип, на котором основаны циклические измерители скорости звука. А именно, излучается очень короткий импульс, который воспринимается приемником на заданном расстоянии от излучателя, далее рассчитывается время, за которое импульс проходит это расстояние. Известно, чтобы определить скорость надо иметь две точки. Поэтому посылая две короткие посылки, с заданным сдвигом во времени, дельфин имеет некоторый эталон, одной из основных характеристик является временной сдвиг во времени.

Алгоритм обработки отраженного от цели сигнала сонара дельфина, может быть представлен следующими операциями;

1. По каждому отраженному импульсу определяет расстояние до объекта  $\Delta R = R_1 - R_2$  (если  $\Delta R > 0$ , цель приближается, в противном случае удаляется).
2. Определяет радиальную скорость цели как результат деления  $\Delta R$  на временной сдвиг между импульсами.

При измерении ускорения (вторая производная от расстояния) необходимо иметь три точки, что соответствует излучению трех импульсов.

В этом случае, алгоритм измерения следующий:

1. По трем отраженным импульсам, определяются  $\Delta R_1$  и  $\Delta R_2$ .
2. Далее определяется  $\Delta^{(1)}R = \Delta R_1 - \Delta R_2$ .
3. Определяется ускорение как результат деления  $\Delta^{(1)}R$  на разность временных интервалов между импульсами.

В целом, данные проведенных исследований свидетельствуют о том, что сонар дельфина ориентирован на временную обработку, а не на частотную.

### Вывод

Данные исследования позволяют сделать следующие выводы,

1. Сонар дельфина способен различать ускоренный характер движения цели и равномерное движение с постоянной скоростью. При этом дельфин адаптирует работу сонара в зависимости

от дальности цели и от характера ее движения, применяя в случае постоянной скорости объекта двухимпульсные посылки, а в случае переменной скорости – трехимпульсные сигналы и варьируя период следования локационных сигналов в зависимости от расстояния до цели.

2. Для определения скорости и ускорения дельфин реализует не частотный метод определения динамических характеристик цели, а обработка проводится во времени, о чем свидетельствует использование им коротких импульсов (последовательность «щелчков»).

Необходимо отметить, что необходимо проводить дальнейшие исследования, которые должны быть направлены на то, насколько вероятно осуществление сонаром дельфина операции осреднения по нескольким посылкам (при определении скорости их число должны быть кратным 2, ускорения 3).

#### Список литературы

1. *Hikling R.* Analysis of echoes from a solid elastic sphere in water // *J. Acoust. Soc. Amer.* – 1962. – V. 34. – № 10. – P. 1582–1591.
2. *Cahlander D.A.* Echolocation with wideband waveforms bat sonar signals // *Techn. Rep. Lincoln Lab. MIT.* – 1964. – № 271. – P. 544–546.
3. *Poulter T. C.* The use of active sonar by the California Sea Lion // *J. Audit. Res.* – 1966. – № 6. – P. 165–173.
4. *Дубровский Н.А.* Эхолокация у дельфинов. – М., 1975. – 77 с.
5. *Константинов А.И., Макаров А.К., Соколов Б.В., Липманова Е.Э.* Доплеровские эхолокационные системы животных // *Проблемы нейрофизиологии. Нервная система.* – 1978. – В. 20. – С. 46–58.
6. *Макаров А.К., Соколов Б.В.* Компенсация доплеровских сдвигов эхолокационной системы животных // *Звуковая коммуникация, эхолокация и слух.* – 1980. – С. 65–72.
7. *Альтман Я.А.* Слуховая система. – Л.: Наука, 1990. – 620 с.
8. *Au W.W.L., Hastings M.C.* Principles of Marine Bioacoustics. – Springer. New York. – N.Y., 2008. – 680 p.
9. *Зайцева К.А., Королев В.И., Ахи А.В., Бутырский Е.Ю.* Дельфин *Tursiops truncatus* и его локационные возможности // *Национальная безопасность и стратегическое планирование.* – 2018. – № 1(21). – С. 74–82.
10. *Зайцева К. А., Королев В.И., Ахи А.В., Бутырский Е.Ю.* Измерение дельфином *Tursiops truncatus* параметров движения подвижной цели// *Национальная безопасность и стратегическое планирование.* – 2018. – № 23(3). – С. 67–73.
11. *Зайцева К. А., Королев В. И., Кривченко А.И., Ахи А.И., Бутырский Е.Ю.* Разрешение по ускорению движущихся целей локатора дельфина (*Tursiops truncatus*) // *Национальная безопасность и стратегическое планирование.* – 2019. – № 25(1). – С. 27–32.
12. *Jacob D.* Auditory frequency discrimination in the atlantic bottlenose dolphin *Tursiops truncatus* // *Montque: a preliminary report* // *J. Acoust. Soc. Amer.* – 1972. – V. 52. – № 2. – Part 2. – P. 696.

Статья поступила в редакцию 14 апреля 2019 г.  
Принята к публикации 2 июня 2019 г.