РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ

(ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК)

МОСКВА

Т. 12, №2 1998г.

УДК 534.88:599.537

ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТЬ ЭХОЛОКАТОРА ДЕЛЬФИНА

© 1998 г. В.А. РЯБОВ, Г.Л. ЗАСЛАВСКИЙ

Институт биологии южных морей, Карадагский филиал
334876, Крым, Феодосия, ул. Науки, 24

Поступила в редакцию 23.08.95 г.
После доработки 16.06.97 г.

В экспериментах по распознаванию мишеней рассмотрены механизмы защиты эхолокационной системы дельфина от тональной и широкополосной помех. С ростом уровня помех животное увеличивает уровень звукового давления зондирующих импульсов, сохраняя практически постоянным (с точностью до ±1 дБ) отношение сигнал/помеха.

Определена полоса частот (40 -140 кГц), эффективно используемая дельфином для эхолокации.

Описана способность дельфина к пространственной селекции сигнала и помех при дифференцировании мишеней, в полосе частот эхолокации ширина диаграммы направленности эхолокационной системы в горизонтальной плоскости 12-14°.

Определен максимальный уровень ($12 \cdot 10^4$ Па) звукового давления зондирующих импульсов эхолокатора дельфина в закрытом бассейне.

Ключевые слова: эхолокация, дельфин.

Введение

Первые оценки помехозащищенности эхолокационной системы дельфина определили разные направления ее адаптации к помехам. По мнению одних авторов, основным способом защиты от помех является смещение максимума спектра зондирующих сигналов в сторону от спектра помехи [1, 8, 9]. В то же время другие авторы считают, что выводы в пользу целенаправленной подстройки параметров сигналов дельфина не могут быть надежными из-за отсутствия необходимого контроля положения головы животного относительно приемных гидрофонов. В этих работах показано, что изменение положения максимума спектров зондирующих импульсов при решении дельфинами разных эхолокационных задач не более вариабельно, чем при решении одной и той же задачи, и не превышает 10-15 кГц [12-14].

Есть мнение, что при увеличении интенсивности помехи уровень зондирующих сигналов почти не изменяется и, следовательно, уменьшается отношение полезный эхо-сигнал — помеха [1]. В то же время в работе [2] было получено практически линейное возрастание звукового давления зондирующих импульсов с ростом звукового давления помехи. Это указывает на стремление дельфина сохранить отношение эхосигнал/помеха постоянным.

С ростом полосовых и широкополосных шумовых помех максимальные пиковые

звуковые давления зондирующих импульсов дельфинов достигали в закрытых бассейнах 40-62 дБ [2], относительно 1 Па на расстоянии 1 м, и до 103-106 дБ в открытой акватории [12-14].

Данных о защищенности эхолокатора дельфина от помехи, разнесенной в пространстве с полезным эхосигналом, при обнаружении и распознавании подводных объектов, до настоящего времени не имеется, хотя очевидно, что такие данные могли бы характеризовать помехозащищенность эхолокатора дельфина. В слуховых экспериментах было показано, что дельфин осуществляет пространственную селекцию сигнала и помехи благодаря довольно узкой характеристике направленности слуха [5, 11].

Анализ имеющихся литературных данных свидетельствует о существовании противоречивых мнений относительно возможных механизмов помехозащиты эхолокатора афалины. Пространственная помехозащищенность эхолокационной системы афалины практически не изучена. Цель данной работы - изучение механизмов защиты эхолокатора дельфина афалины от аддитивных помех в ходе решения задач эхолокационного распознавания мишеней. Конкретные задачи состояли в измерении зависимости амплитуды зондирующих импульсов дельфина от пространственного положения источника помехи, ее интенсивности и частоты. В качестве помех использовались тональные и частотно-модулированные (ЧМ) сигналы разных частот и широкополосный шум.

Методика

Эксперименты проводились в бетонном бассейне размером 20 х 12 х 3 м по методике двигательных условных рефлексов с пищевым подкреплением. Дельфин был приучен по сигналу подходить к стартовым воротам (рис. 1) в ожидании предъявления мишеней. Его задачей было определение стороны разделительной сети, с которой расположена положительная мишень (латунный шар диаметром 30 мм). За подплывание к мишени дельфин получал пищевое подкрепление. В качестве мишеней использовались шары разного диаметра, изготовленные из разных материалов. С помощью кинокамер регистрировалось положение головы дельфина в вертикальной и горизонтальной плоскостях в момент излучения зондирующих импульсов.

Помеха излучалась через плоский направленный излучатель диаметром 11 см, располагавшийся за мишенями на глубине 1 м. Применение направленного преобразователя существенно снижало уровень реверберационных помех, благодаря чему повышалась точность измерений. Для этой же цели наряду с тональными помехами в качестве мешающих сигналов использовались частотно-модулированные ЧМ-тоны, которые не создают в бассейне стоячих волн. Девиация частоты ЧМ-помех составляла ±10 кГц, а частота модуляции 3 Гц. Эхолокационные сигналы регистрировались с помощью измерительных трактов, имевших в полосе частот 10-180 кГц неравномерность частотных характеристик ±1,5 дБ [3].

Приемные гидрофоны опускались на глубину 1 м. Чтобы исключить искажения формы зондирующих импульсов, динамический диапазон тракта регистрации достигал 130 дБ (суммарный по двум каналам). При этом IV канал (рис. 2, *в*) был предназначен для записи сигналов с максимальным звуковым давлением, а III канал - для слабых сигналов. Третий канал имел больший коэффициент усиления и сигналы со звуковым давлением более $3 \cdot 10^4$ Па записывались на этом канале с нелинейными искажениями. Уровень звукового давления помехи в районе стартового положения дельфина (II и V каналы, рис. 2, в) контролировался с помощью приемника *4* (рис. 1). Сигналы со всех приемников подавались на пятиканальный осциллограф С1-33 и синхронно с регистрацией положения головы дельфина записывались на кинопленку. Благодаря синхронной съемке зондирующих сигналов и положения головы дельфина для анализа сигналов выбирались только те из них, которые излучались в пределах ±1,5° относительно направлений на мишени (рис. 2).

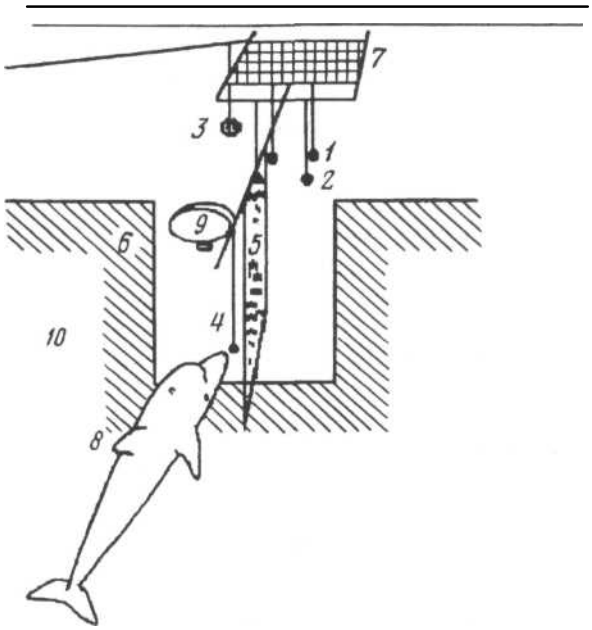

Рис. 1. Схема эксперимента: *1* - приемники, *2* - мишени, *3* - излучатель помехи, *4* - приемник контроля помехи, *5* - разделительная сеть, 6 - стартовые ворота, 7 - мостики, *8* - дельфин на старте, *9* - надводная камера, *10* - подводная камера

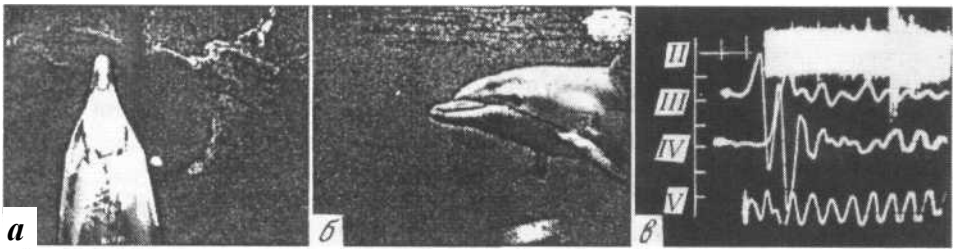

Рис. 2. Пример синхронной регистрации положения головы в горизонтальной (*а*) и вертикальной (*б*) плоскостях и осциллограмм зондирующих импульсов (*в*) при различении афалиной латунных шаров диаметрами 50 и 30 мм. На II и V каналах записывалась помеха в месте старта дельфина, на III и IV каналах - эхолокационные импульсы. Скорость развертки на II канале 1500 мкс/дел, на остальных 10 мкс/дел

Для измерения пространственной помехозащищенности излучатель помехи перемещался относительно стартового положения животного в горизонтальной плоскости. Угол φ, под которым со старта дельфина виден источник помехи, определялся относительно разделительной сети.

В обеих сериях экспериментов расстояние от стартовой позиции дельфина до мишеней и глубина их погружения составляли 7,5 и 1 м соответственно. Мишени раздвигались относительно разделительной сети на угол ±1,5°.

Пороги определялись по уровню 75% правильных реакций животного.

Результаты

В первой серии экспериментов были исследованы зависимость формы и звукового давления зондирующих импульсов дельфина от частоты помехи в ходе решения задачи различения латунных шаров диаметрами 50 и 30 мм. В качестве помех ис-

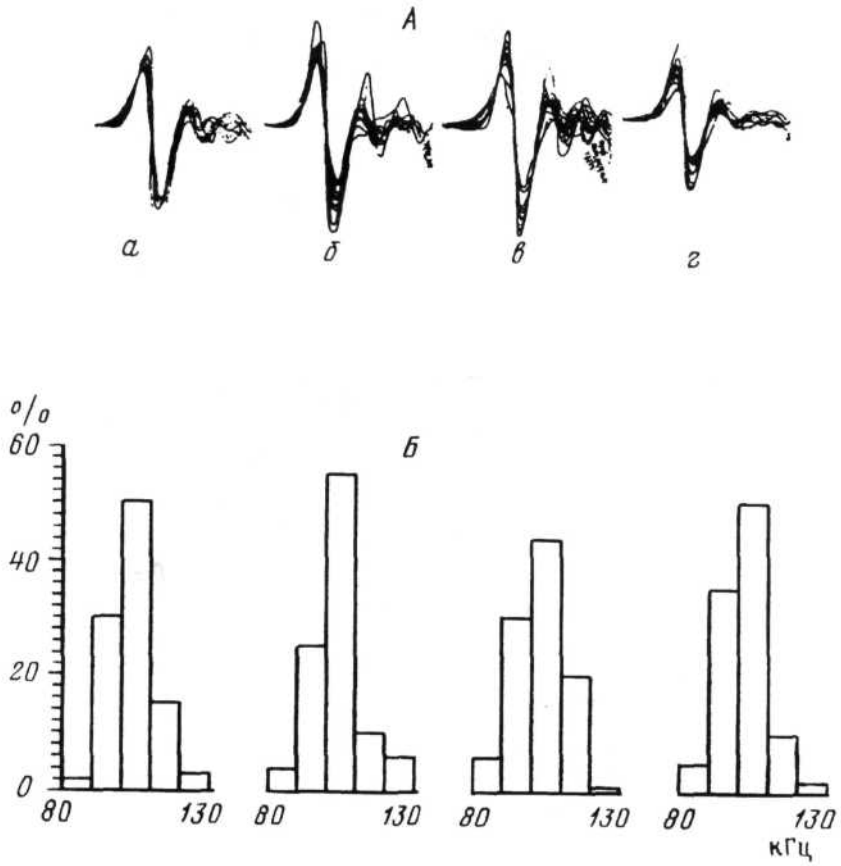

Рис. 3. Примеры осциллограмм зондирующих импульсов (наложение) *(А)* и гистограммы распределения максимумов их амплитудных спектров *(Б)* при частотах тональной помехи: *а* - 40, *б* - 80, *в* - 100 и *г* - 140 кГц, в ходе решения задачи распознавания мишеней

пользовались тональные или ЧМ-сигналы, частота которых изменялась в диапазоне от 10 до 180 кГц. Звуковое давление тона, использовавшегося в качестве помехи, при изменении его частоты поддерживалось постоянным и в районе старта дельфина составляло 6 Па.

Анализ осциллограмм зондирующих импульсов показывает, что дельфин не изменяет форму и соответственно положение максимума спектра эхолокационных сигналов при действии тонов различных частот в качестве помех (рис. 3). Не менее 75% зондирующих импульсов имеют максимум амплитудного спектра, близкий к 100 кГц, независимо от частоты помехи.

В то же время хорошо видно, что от частоты помехи существенно зависит звуковое давление зондирующих импульсов (рис. 4). Таким образом, по значению звукового давления зондирующих импульсов дельфина оказывается возможным определить степень воздействия, которое оказывает помеха той или иной частоты на распознавание дельфином мишеней.

Кривая на рис. 4 фактически характеризует полосу рабочих частот эхолокатора дельфина. Зависимость звукового давления зондирующих импульсов от частоты ЧМ-тона (помехи) практически такая же, как и для тональной помехи (рис. 4), что повышает достоверность полученных данных.

С ростом звукового давления помехи монотонно возрастает звуковое давление

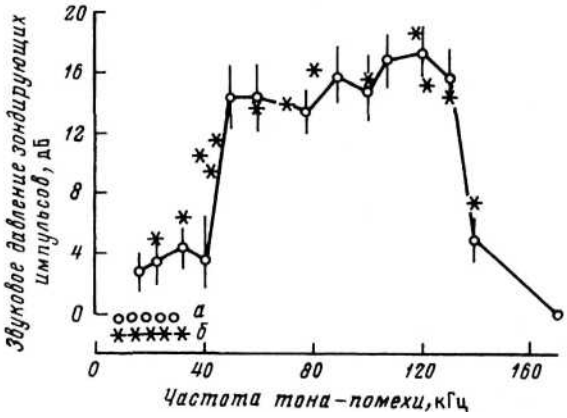

Рис. 4

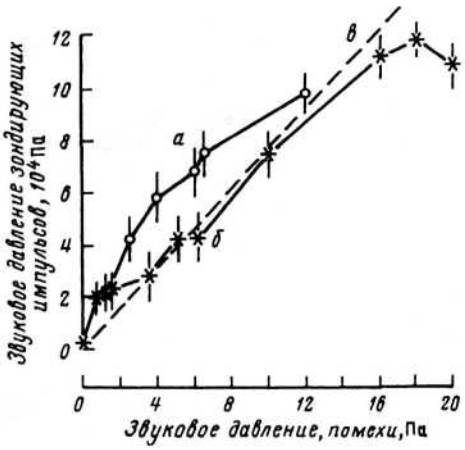

Рис.5

Рис. 4. Зависимость пикового давления зондирующих импульсов дельфина от частоты тональной помехи (*а*) и от средней частоты ЧМ-помехи (*б*) в ходе решения задачи распознавания мишеней. 0 дБ соответствует давлению $7{,}3 \cdot 10^3$ Па

Рис. 5. Зависимость пикового давления зондирующих импульсов афалины от эффективного давления широкополосной помехи (50—100 кГц) при распознавании латунных шаров диаметрами 46 и 30 мм: а - φ = 0°, б - φ = 10°, *в* - P_i/P_p = const

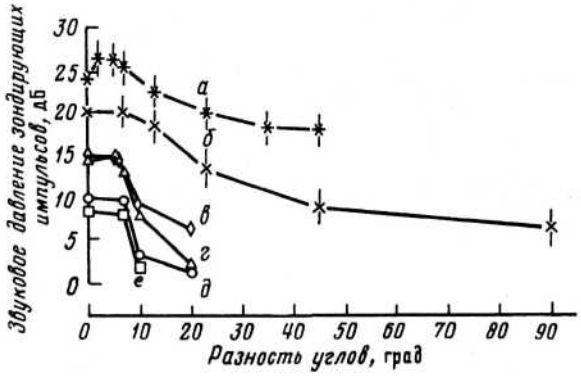

Рис. 6. Зависимость пикового звукового давления зондирующих импульсов дельфина от разности углов, под которыми видны со стороны дельфина источник помехи и разделительная сеть, при распознавании латунных шаров диаметрами 46 и 30 мм: *а, б, в* - широкополосная помеха (50-100 кГц) со звуковым давлением 12 Па (*а*), 6 Па (*б*), 4 Па (*в*); *г, д, е* - тональная помеха (60 кГц) 4 Па (*г*), (110 кГц) 2,5 Па (*д*) и (140 кГц) 6 Па (*е*); 0 дБ соответствует звуковому давлению $5 \cdot 10^3$ Па

зондирующих импульсов (рис. 5), при уровнях помехи свыше 18 Па рост звукового давления эхолокационных импульсов прекращается и происходит срыв дифференцировки. При этом максимальное давление зондирующих импульсов дельфина достигает $12 \cdot 10^4$ Па.

Во второй серии экспериментов изучалась способность афалины к угловой селекции сигналов. Из рис. 5 видно, что источник помехи, видимый со стороны дельфина под углом 10° относительно разделительной сети (8,5° относительно мишени), оказывает меньшее мешающее воздействие (кривая *б*), чем помеха, направление на источник которой совпадает с направлением на источник полезного эхосигнала (кривая *а*). Раз-

личая в звуковых давлениях эхолокационных сигналов для источников помехи, расположенных под равными углами относительно мишеней и при одинаковых давлениях помехи в районе старта дельфина, показаны на рис. 6. Поскольку диаграмма симметрична относительно разделительной сети, на рис. 6 приведен ее вид только для правой полуплоскости. Кривые на рис. 6, по-видимому, характеризуют направленность эхолокатора дельфина. Ширина полученных характеристик направленности по уровню -3 дБ близка к 12-14°.

Обсуждение

Результаты первой серии экспериментов показывают, что при распознавании мишеней афалиной в условиях тональных и ЧМ-помех сохраняется определенная стабильность формы и амплитудного спектра зондирующих импульсов. Эти результаты отличаются от данных [1, 8, 9], но согласуются с работами [12-14] и позволяют предположить, что при решении эхолокационных задач дельфины используют зондирующие амплитуды с постоянной формой и положением максимума амплитудного спектра. Незначительные флуктуации формы скорее всего могут быть связаны с погрешностями при записи осциллограмм, а также, возможно, с особенностями работы механизма формирования и излучения зондирующих импульсов.

Важно подчеркнуть, что даже при действии тональной помехи дельфин увеличивает звуковое давление эхолокационных импульсов. Это указывает на то, что дельфин при распознавании мишеней не отстраивается от помех с помощью селекции по частоте и перестройки спектра эхолокационного сигнала. Впрочем, это же прямо следует из постоянства формы эхолокационных импульсов, излучаемых дельфином при действии помех разной частоты.

Из полученных результатов следует, что афалина эффективно использует полосу частот от 40 до 140 кГц при распознавании подводных объектов. Эта зависимость, по-видимому, определяет диапазон частот, необходимый афалине для обработки эхосигналов.

Согласование полосы частот эхолокационного анализа (рис. 4) и ширины полосы зондирующих импульсов [10] указывает на эффективное использование энергии зондирующих импульсов эхолокационной системы дельфина.

Если аудиограмма слуха дельфина характеризует весь диапазон слухового восприятия животного, в том числе и диапазон, используемый для коммуникации, то зависимость, представленная на рис. 4, определяет рабочую полосу частот эхолокатора афалины в режиме активной локации при распознавании мишеней. Она дополняет понятие эхолокационного "активного" слуха [4].

При распознавании мишеней звуковое давление зондирующих импульсов возрастает монотонно с ростом давления помехи, так же как указано в работе [2]. В то же время кривые на рис. 5 расположены гораздо выше аналогичной кривой [2]. Это расхождение, по-видимому, можно объяснить равной степенью мешающего воздействия, оказываемого шумом в полосе частот 10-23 кГц [2], и полосовым шумом 50-100 кГц, излучавшимся при получении зависимости на рис. 5.

При увеличении уровня помехи в 4,4 раза (от 3,6 до 16 Па) уровень зондирующих импульсов (рис. 5) возрастает в 4 раза (с $2{,}8 \cdot 10^4$ до $11{,}3 \cdot 10^4$ Па), следовательно, на этом участке дельфин с точностью до ±1 дБ поддерживает отношение сигнал/помеха постоянным (зависимость практически совпадает с P_i/P_p = const).

Зондирующие импульсы меньших уровней звуковых давлений, по-видимому, дельфину излучать легче (для уровней помехи, меньших 3 Па) и зависимость идет несколько выше P_i/P_p = const.

Это может свидетельствовать о стремлении дельфина сохранить отношение звуковых давлений эхосигнал/помеха постоянным вплоть до самых максимальных значений уровней звуковых давлений зондирующих импульсов.

Максимальное пиковое звуковое давление зондирующих импульсов достигает

$12 \cdot 10^4$Па при звуковом давлении полосового шума 18 Па. Дальнейший рост звукового давления зондирующих импульсов скорее всего невозможен. При этих звуковых давлениях помехи возможность распознавания, по-видимому, ограничивается силой цели мишеней, т.е. для мишеней с относительно большей силой цели отношение эхосигнал/помеха станет выше пороговой величины, и для полной маскировки понадобится помеха с относительно большим уровнем.

Значение максимального звукового давления зондирующих импульсов практически совпадает с данными, полученными для открытой акватории [12-14], где оно достигало $13 \cdot 10^4$Па. Вероятно, эти звуковые давления зондирующих импульсов являются предельно возможными для дельфинов.

Характеристики направленности эхолокационной системы дельфина при работе в режиме активной локации (рис. 6) имеют ширину 12-14°. Полученные значения близки к ширине характеристики направленности слуха при пассивном обнаружении сигнала [5, 11]. Но если при пассивном обнаружении ширина характеристики сужается с ростом частоты, то ширина кривых на рис. 6 практически не зависит от частоты. По-видимому, это связано с тем, что животному для обработки эхосигналов необходимо иметь максимально широкую полосу частот, а максимальная ширина диаграммы определяется низкими частотами. Другими словами, для анализа эхосигналов животному одинаково важны как высокие, так и низкие частоты во всей полосе от 40 до 140 кГц, что может определять независимость ширины характеристик на рис. 6 от частоты.

В то же время положение кривых на рис. 6 зависит не только от значения звукового давления, но и от частоты помехи и находится в строгом соответствии с графиком, приведенным на рис. 4.

Следует отметить, что излучатель помехи при полученных двух верхних кривых располагался за мишенями на расстоянии 10 см от них, в связи с этим при малых углах разнесения источника помехи и мишеней дельфин воспринимал также интенсивное отражение от плоского излучателя. При расстоянии между мишенью и излучателем 10 см относительная задержка эхосигналов составляет 133 мкс.

Это отражение сильно затрудняло дельфину решение задачи, в результате чего происходил срыв дифференцировки мишеней. В этом случае увеличение давления зондирующих импульсов приводило к равному увеличению давлений эхосигналов и от мишеней и от излучателя, что не давало дельфину выигрыша в отношении эхосигнал/помеха. Видимо, поэтому для этих кривых отсутствует относительно быстрый спад на участке от 5 до 10° по сравнению со случаем, когда излучатель помехи расположен гораздо дальше от мишеней. При получении всех кривых, расположенных ниже, излучатель помехи находился за мишенями на расстоянии 1,2 м. Отражение от излучателя помехи, приходившее почти на 1,5 мс позже эха от мишеней, практически не мешало дельфину, и он, повышая звуковое давление зондирующих импульсов, мог поддерживать постоянным необходимое отношение эхосигнал/помеха и уверенно решать задачу распознавания.

Таким образом, несмотря на то что с ростом давления импульсов в бассейне повышается уровень реверберационных помех, дельфин успешно отстраивается от них. Это свидетельствует о высокой защищенности эхолокатора дельфина от реверберационных помех, которая, по-видимому, обеспечивается высокой разрешающей способностью по времени эхолокационной системы и слуха, близкой к 25 мкс [6, 7, 10], а также направленностью источника зондирующих сигналов дельфина и его приемной системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абрамов А.П., Голубков А.Г., Королев В.И., Фрадкин В.Б.* О помехозащищенности гидролокатора дельфина //Тр. Акуст. ин-та. 1971. Вып. 17. С. 24-28.
2. *Бабкин В.П., Дубровский Н.А.* О дальности действия и помехоустойчивости эхолокационного аппарата дельфина афалины при обнаружении различных мишеней // Тр. Акуст. ин-та. 1971. Вып. 17. С. 29-42.

3. *Безруков В.К., Гасско Р.Е., Дубровский Н.А., Заславский ГЛ.* Многоканальная система регистрации импульсных гидроакустических сигналов // Матер. VIII Всесоюзн. акуст. конф. 1973. С. 145-147.
4. *Белькович В.М., Дубровский Н.А.* Сенсорные основы ориентации китообразных. Л.: Наука, 1976. С. 204.
5. *Зайцева К.А., Акопиан А.И., Морозов В.П.* Помехоустойчивость слухового анализатора дельфина как функция угла предъявления помехи // Биофизика. 1975. Т. XX. Вып. 3. С. 519-531.
6. *Заславский ГЛ., Рябов В.А.* О временном анализе звуков дельфином афалиной // Вопросы судостроения. Сер. "Акустика". Л.: ЦНИИ "Румб", 1979. Вып. 13. С. 4-10.
7. *Заславский ГЛ., Рябов В.А.* Измерение афалиной интервалов времени // Матер. XI Всесоюзн. акуст. конф. М., 1991. Секц. Ц. С. 33-35.
8. *Романенко Е.Е.* О целенаправленном изменении дельфином спектрального состава эхолокационных импульсов // Докл. IX Всесоюзн. акуст. конф. М., 1977. Секц. Ц. С. 37-40.
9. *Романенко ЕВ., Китаин В.Я.* Особенности работы эхолокационного аппарата дельфина афалины в условиях воздействия шумовой помехи на его органы слуха // Вопр. судостроения. Сер. "Акустика". Л.: ЦНИИ "Румб", 1979. Вып. 13. С. 56-64.
10. *Рябое В.А.* Спектрально-временной анализ акустических импульсных сигналов дельфином афалиной. Дис. ... канд. биол. наук. Л., 1991. С. 159.
11. *Чилингирис В.И., Иваненко Ю.В.* Направленность слухового приема черноморских дельфинов // Докл. IV Всесоюзн. конф. по бионике. М., 1973. Т.П. С. 247-250.
12. *Au W.W.L., Floyd R.G., Penner R.A., Marchison A.K.* Measurement of echolocation signals of the Atlantic bottlenosed dolphin (Tursiopse truncatus) in open water // J. Acoust. Soc. Amer. 1974. V. 56. №4. P. 1280-1290.
13. *Au W.W.L., Snyder C.J.* Long - range target detection in open waters by an echolocation atlantic bottlenosed dolphin // J. Acoust. Soc. Amer. 1980. V. 68. № 4. P. 1077-1084.
14. *Au W.W.L., Penner R.H.* Target detection in noise by echolocating atlantic bottlenose dolphins // J. Acoust. Soc. Amer. 1981. V. 70. № 3. P. 687-693.

NOISEIMMUNITY OF THE DOLPHIN SONAR

V.A. RYABOV, G.L. ZASLAVSKY

Karadag Branch of Institute of Biology of Southern Seas,
the Crimea, Feodosia, Kurortnoe

The masking immunity mechanisms of the dolphin echolocation system for tonal and wideband maskers were studied while experimenting on target recognition. The animal is proven to increase the level of the echolocation clicks sound pressure along with enlargement of the masker level to keep the constant signal/masker ratio.

The frequencies band (40-140 kHz) effectively used by the dolphin for echolocation is determined.

The dolphins ability is described, to detect the echo at presence of masker with different than target bearing. The width of the directivity pattern of the dolphin sonar is shown to be 12-14 grad at the horizontal plane.

The highest sound pressure of clicks to be used by the bottlenosed dolphin are determined. The maximum levels of echolocation pulse sound pressure were $12 \cdot 10^4$ Pa in a pool.

Key words: echolocation, dolphin.