УДК 591.185.1:534.88

© **1999**

**В.А. Рябов, Г.Л. Заславский**

# Временной анализ эхосигналов афалиной

*(Представлено академиком НАН Украины А.А. Созиновым)*

*The capability of a bottlenose dolphin to detect a pause in the acoustic white noise is investigated. The curves of the mask of a short white noise pulse by a long one in the hearing of dolphin and human are present. It is demonstrated that dolphins can discriminate pairs of tone pulses with different interpulse intervals, by time features. It is shown that a dolphin can analyze time features of echosignals with time resolution close to potential time resolution of his emitted echolocation pulses, 10-12 μs.*

В последнее время в литературе рассматриваются в основном два признака, на основании которых может быть основано распознавание эхосигналов дельфинами, — временной и спектральный. И если данных, характеризующих способность дельфина к частотному анализу эхо, в литературе накопилось достаточно, и модели обработки информации в слуховой системе строятся в спектральной области, то определению возможностей временного анализа посвящены лишь отдельные работы [1, 2]. Это объясняется тем, что эхолокатор дельфина представляет широкополосную импульсную систему с высокой потенциальной разрешающей способностью по времени (РСВ) зондирующих импульсов 10-12 мкс [4], и многие исследователи, похоже, не допускают мысли о том, что подобные характеристики могут быть реализованы в слухе животного. В то же время в работах [1, 2] измерения проводились на стимулах, представляющих собой когерентные импульсы типа зондирующих импульсов афалины. Пары таких импульсов имеют периодичность в их амплитудных спектрах, строго связанную с величиной межимпульсных интервалов между импульсами в парах, и, по-видимому, полученные результаты не могут быть однозначно интерпретированы.

При изучении способности слуховой системы различать сигналы по частотным или временным характеристикам экспериментаторы сталкиваются с определенными трудностями в выборе адекватных звуковых стимулов, временная функция и спектр которых, как известно, связаны между собой преобразованием Фурье. Если в психоакустических опытах человек сам сообщает, в чем именно заключаются различия в сигналах, то при работе с животными такой информации экспериментатор не получает. Это, естественно, затрудняет поиск признаков слухового распознавания акустических стимулов.

Учитывая, что слух обладает инерционностью (как система с ограниченной полосой пропускания), можно подобрать такие сигналы, которые могут различаться животным только по какому-нибудь одному признаку. Так, авторами рассмотрена возможность применения когерентных импульсов для исследования способностей дельфина к частотному анализу эхосигналов, а также шумовых импульсов и паузы в шумовом импульсе для изучения возможностей временного анализа эхосигналов [3-7].

По нашему мнению, наиболее адекватными стимулами для изучения временных характеристик слуха могут быть шумовые импульсы. И, хотя чисто теоретически, в амплитудных спектрах пар шумовых импульсов также должны быть осцилляции, связанные с величиной межимпульсного интервала, как показали результаты наших измерений, спектр каждой пары импульсов значительно отличается. В связи с тем, что начальная фаза каждо-

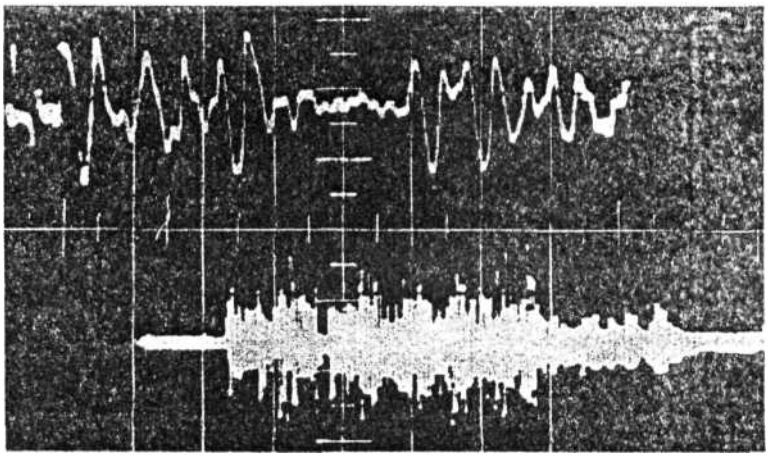

Рис. 1. Осциллограмма шумового акустического импульса с паузой. Скорость развертки: верхний луч — 50 мкс/дел., нижний луч — 600 мкс/дел.

го импульса носит случайный характер, максимумы и нули функции спектральной плотности, для различных реализаций пар, существенно смещаются по оси частот и изменяется их величина. Лишь на случайных участках частот период осцилляции соответствует выражению 1/T, где $T$ — межимпульсный интервал. На рис. 1 изображена осциллограмма шумового акустического импульса с паузой.

Если длительность шумового импульса достаточно велика по сравнению с паузой, то его энергетический спектр не отличается от шумового импульса, включающего паузу.

Сигналы такого типа являются неразличимыми для дельфина по спектральным характеристикам, и поэтому распознавать их он мог только по разнице в межимпульсных интервалах либо обнаруживая паузу в шуме.

Целью работы является измерение разрешающей способности слуха афалины по времени. Эта фундаментальная характеристика слуха дельфина определена в работе как минимальная длительность паузы в шуме, которую еще может обнаружить дельфин. Наряду с шумовыми импульсами в работе использовались также пары тональных импульсов, имеющие настолько различные частоты заполнения, что их амплитудные спектры практически не перекрываются. Спектр таких пар не зависит от величины межимпульсного интервала, и единственным признаком, на основании которого пары могут быть различимы, является разница в длительностях интервалов между импульсами.

Опыты проводились по методике условных двигательных рефлексов с пищевым подкреплением. Сравниваемые сигналы излучались последовательно через преобразователи, расположенные по обе стороны разделительной сети на расстоянии 2 м друг от друга и глубине 0,8 м, с частотой 8 имп/с. Расстояние от стартовой зоны дельфина до излучателей составляло 7 м. В качестве излучателей шума использовались магнитострикционные преобразователи. Основная энергия излучаемого шума приходилась на полосу частот от 40 до 100 кГц.

Для излучения тональных импульсов использовались сферы из пьезокерамики титаната бария диаметром 12 мм. Частоты заполнения первого и второго импульсов пары составляли соответственно 100 и 130 кГц. При длительности первого импульса 60 мкс, а второго — 200 мкс, ближайшие составляющие спектров импульсов пары на оси частот разнесены не менее чем на 16 кГц, поэтому спектр пары не зависит от значения межимпульсного

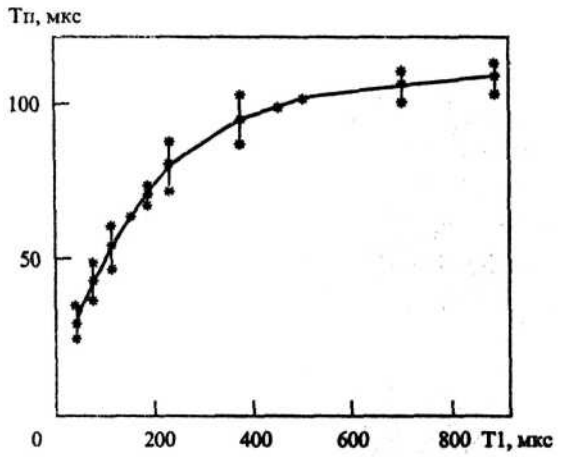


Рис. 2. Зависимость пороговой длительности паузы (Тп), обнаруживаемой дельфином, от длительности шума, предшествующего паузе (Т1) в шумовом импульсе длительностью 5 мс

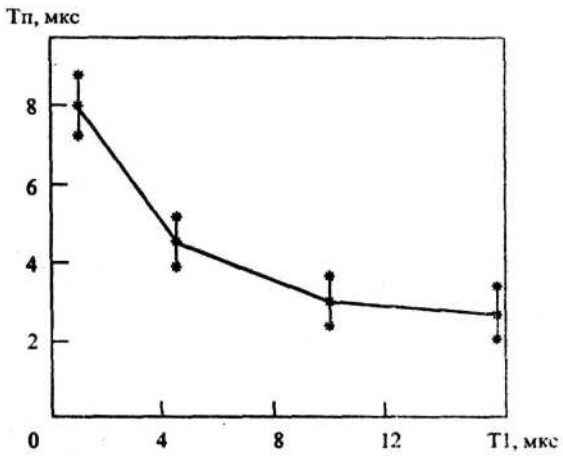


Рис. 3. Зависимость пороговой длительности паузы, обнаруживаемой человеком (Тп), от длительности шума, предшествующего паузе (Т1) в шумовом импульсе длительностью 30 мс

интервала.

Интенсивность излучаемых сигналов поддерживалась на уровне 48 дБ относительно порога их обнаружения.

Стремясь, по возможности, ограничить маскировку паузы реверберационными помехами, авторы ограничились в большинстве опытов длительностью шумовых импульсов 5-10 мс. Из тех же соображений пауза была расположена не далее чем на 1 мс от начала импульса, иначе она маскировалась импульсом, отраженным от стенки, находившейся на расстоянии 0,8 м от излучателей. Для сравнительных исследований слуха человека использовались стереофонические головные телефоны.

В первых опытах, несмотря на длительное обучение, дельфин не смог обнаружить паузу в непрерывно излучаемом шуме, однако удалось обучить его обнаруживать паузу в шумовом импульсе. Опыты начались с различения пар шумовых импульсов, чему дельфин был обучен ранее. Постепенно увеличивая длительность первого импульса до длительности меньшего межимпульсного интервала, перешли к различению импульса без паузы и импульса с паузой. Далее не представляло особенного труда, увеличив длительность шумового импульса, перейти к обнаружению паузы в непрерывном шуме.

Переход от различения пар по интервалу к обнаружению паузы в импульсе проявился в резком снижении порогов по межимпульсному интервалу. Так, например, при длительности импульсов и меньшего межимпульсного интервала соответственно 740 и 900 мкс пороговая разница в межимпульсных интервалах составила 220 мкс. Но как только длительность импульсов увеличивали до 800 мкс, она скачком уменьшалась до 50 мкс. Хотя дельфину по прежнему предлагалось различать две пары импульсов, у пары с меньшим межимпульсным интервалом длительность паузы оказалась меньше пороговой, и дельфин начал воспринимать пару как один импульс. Замена этой пары одним импульсом длительностью, равной длительности пары с паузой, осталась незамеченной дельфином, который, таким образом, перешел к различению пары и одиночного шумовых импульсов. Различать такие сигналы при больших длительностях импульсов можно лишь путем обнаружения паузы.

Зависимость длительности минимальной паузы, обнаруживаемой дельфином, от ее по-

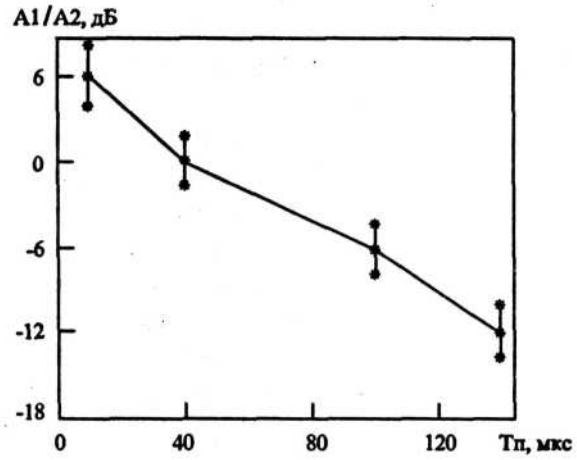


Рис. 4. Зависимость пороговой длительности паузы (Тп), обнаруживаемой дельфином в шумовом импульсе, от соотношения интенсивностей шума до паузы А1 и после паузы А2

ложения в шумовом импульсе (относительно начала импульса) показана на рис. 2.

При различении тональных импульсов дельфин уверенно различал пару, у которой интервал между тональными импульсами равнялся 100 мкс, от пары с межимпульсным интервалом 140 мкс. Столь же успешно он различал межимпульсные интервалы, равные 160 и 200 мкс.

Минимальная длительность слышимой дельфином паузы зависит от ее положения в шумовом импульсе и определяется длительностью участка шума до паузы (рис. 2). Здесь для Т1, меньших приблизительно 300-400 мкс, идет быстрое возрастание пороговой длительности паузы, что может быть связано с ростом прямой маскировкой паузы увеличивающейся длительностью шума до паузы, и дальше она изменяется медленно. Даже в непрерывном шуме пороговая длительность паузы больше не возрастает. При длительностях, равных 40 и 960 мкс, дельфин обнаруживает паузы длительностью соответственно 30 и 110 мкс. Чем ближе расположена пауза к началу импульса, тем меньше ее пороговая длительность. Интересно отметить, что у человека наблюдается обратная зависимость пороговой длительности паузы от ее положения в шумовом импульсе (рис. 3), что указывает на принципиальное различие слуховой системы дельфина и человека.

Уменьшение интенсивности шумового импульса до паузы затрудняет ее обнаружение. График, представленный на рис. 4, можно рассматривать и как кривую маскировки паузы частью шумового импульса после паузы, и как кривую маскировки первого шумового импульса вторым большей длительности. По-видимому, различие в определениях не имеет принципиального значения, так как при обнаружении импульса на фоне маскера дельфин должен ощутить паузу и, наоборот, при обнаружении паузы — услышать первый импульс.

При уменьшении отношения интенсивностей полезный сигнал /помеха до —12 дБ обнаруживаемая дельфином пауза возрастает до 140 мкс (рис. 4). В то же время при увеличении интенсивности первого импульса в два раза (+6 дБ) дельфин обнаруживает паузу длительностью всего лишь в 10 мкс. Следует при этом учитывать, что вследствие временной суммации в слухе дельфина уровень ощущения импульсных сигналов зависит от их длительности [9]. В связи с этим отношение уровней ощущения маскируемого и маскирующего импульсов может быть существенно меньше отношения интенсивностей этих импульсов.

Известные из литературы дифференциальные пороги слуха афалины по интенсивности

составляют около 10% [8, 10,11]. Пауза длительностью 30 мкс составляет всего 0,6% общей длительности шумового импульса (5 мс) и наличие ее не может сколько нибудь заметно для дельфина изменить энергию этого импульса.

При таком соотношении длительностей паузы и шумового импульса энергетические спектры импульсов с паузой и без паузы совпадают. Поэтому ни энергия, ни спектр не могут служить признаком различения таких сигналов. В то же время обнаружение паузы возможно, если части шумовой посылки, разорванные паузой, воспринимаются раздельно во времени — как два импульса. Учитывая это, минимальную паузу, составляющую 30 мкс и которую еще способен обнаруживать дельфин в шумовом импульсе, можно рассматривать как оценку разрешающей способности слуха афалины по времени. Полученный результат согласуется с данными, полученными при различении пар тональных импульсов (40 мкс).

Эффективность временной маскировки в слухе дельфина уменьшается при уменьшении уровня ощущения маскера [3, 4], и при анализе реальных эхосигналов, уровни ощущения которых меньше шумового маскера, разрешающая способность слуха афалины по времени будет лучше, чем 30 мкс и, по-видимому, будет близка к потенциальной разрешающей способности по времени (10-12 мкс) зондирующих импульсов дельфина [4].

Полученные в работе данные свидетельствуют о том, что слуховая система дельфина, может проводить временной анализ эхосигналов, с разрешающей способностью по времени, близкой к потенциальной РСВ зондирующих сигналов животного.


1. *Вельмин В.А., Дубровский Н.А.* О слуховом анализе дельфином импульсных звуков // Докл. АН СССР. - 1975. - **225**, № 2. - С. 229-232.
2. *Вельмин В.А., Титов А.А.* Слуховое различение интервалов между импульсами у афалины // Морские млекопитающие: Материалы VI Всесоюз. совещ. по изучению морских млекопитающих. – Киев: Наук, думка, 1975. - Ч. 1. - С. 77-78.
3. *Заславский Г.Л., Титов А. А., Рябов В. А.* Исследование прямой и обращенной маскировки у дельфина афалины // Вопросы судостроения. Сер. Акустика. - Л.: ЦНИИ "Румб", 1979. - Вып. 13. - С. 27-31.
4. *Рябов В.А.* Спектрально-временной анализ акустических импульсных сигналов дельфином афалиной: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. - С. - Пб., - 1991. - 16 с.
5. *Заславский Г.Л., Рябов В.А.* О разрешающей способности слуха дельфина афалины по времени // Докл. IX Всесоюз. акуст. конф. - М., 1977. - Секц. Ц. - С. 13-16.
6. *Заславский Г.Л., Рябов В.А.* Временной анализ звуков дельфином афалиной // Вопросы судостроения. Сер. Акустика. - Л.: ЦНИИ "Румб", 1979. - Вып. 13. - С 10-14.
7. *Заславский Г.Л., Рябов В.А.* Измерение афалиной интервалов времени // Материалы XI Всесоюз. акуст. конф. - М., 1991. - Секц. Ц. - С. 33-35.
8. *Бурдин В.И., Марков В.И., Резник А.М. и др.* Определение величины дифференциального порога по интенсивности для белого шума у черноморской афалины // Морфология и экология морских млекопитающих. - М: Наука, 1971. - С. 112-115.
9. *Чилингирис В.И.* Частотно-временные характеристики слуха дельфина афалины // Докл. IX Всесоюз. акуст. конф. - М., 1977. - Секц. Ц. - С. 17-20.
10. *Bullock T.H., Grinnell A.D., Ikezono E. et al.* Electrophysiological studies of central auditory mechanisms in cetaceans // Z. vergl. Physiol. - 1968. - Bd. 59. - P. 117-156.
11. *Johnson C.S.* Auditory masking of one pure tone by another in the bottlenosed porpoise // J. Acoust. Soc. Amer. - 1970. - **49**, No 5. - P. 1317-1318.


*Карадагский природный заповедник НАН Украины*

*Поступило в редакцию 20. 03. 98*