

## НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ АКУСТИКИ ДЕЛЬФИНОВ

Е. В. РОМАНЕНКО

Механизм излучения звуков дельфинами представляет собой одну из наиболее трудных проблем акустики китообразных. При решении этой проблемы исследователи пока вынуждены пользоваться лишь косвенными данными, получаемыми из анализа звуковых сигналов дельфинов, зарегистрированных в дальнем звуковом поле, и в результате морфологических исследований. О природе источника звука в этом случае и месте его расположения можно строить только предположения. Более достоверные сведения о механизме излучения могли бы быть получены при инструментальном проникновении в области предполагаемого расположения источника звука. Однако это исключительно трудная задача, требующая разработки специальных измерительных приборов и отработки соответствующей методики. Тем не менее в последние годы такие попытки делаются. Первые успешные попытки приблизиться к источнику звука дельфина предприняты за рубежом (Dieriks et al., 1971) и в нашей стране (Романенко, 1972) и заключаются в регистрации звука непосредственно на голове дельфина. Этот метод оказался весьма плодотворным и уже позволил установить ряд интересных особенностей излучения звука дельфином (Романенко, 1974). Однако возможности метода оказались значительно шире в результате создания специального комплекса приборов, закрепляемых на дельфине, позволяющего всесторонне изучить акустическую систему дельфинов. В состав комплекса входят следующие приборы: трехканальный широкополосный магнитофон, три миниатюрных гидрофона, генератор шума с двумя режимами работы, несколько излучателей шума, система дистанционного управления работой магнитофона и генератора шума, трассер, позволяющий визуально проследить движение дельфина в полной темноте. Такая аппаратура позволяет изучать эхолокационное поведение дельфина в ситуациях, осложненных наличием искусственно создаваемой помехи. (Детальное описание комплекса приборов см. настоящей сборник, стр. 00).

В настоящей работе будут изложены некоторые предварительные результаты исследования акустической системы афалины с помощью такого комплекса приборов.

### ВЛИЯНИЕ ШИРОКОПОЛОСНОГО АКУСТИЧЕСКОГО ШУМА НА ЭХО-ЛОКАЦИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ ДЕЛЬФИНА

В настоящем эксперименте исследовалось влияние интенсивности широкополосного акустического шума, предъявляемого дельфину локально в различных участках поверхности головы (у предполагаемых акустических входов слуховой системы: у на-

ружных слуховых проходов, на нижней челюсти и лобной подушке), на эхо-локационную активность в процессе решения дельфином задачи по обнаружению предъявляемой ему рыбы в бассейне в полной темноте. Эксперимент состоял из двух частей. В первой части два излучателя когерентного шума (сферы из керамики ЦТС диаметром 30 мм) были закреплены у правого и левого наружного слухового прохода (И1 и И2 на рис. 1). Три гидрофона размещены следующим образом. Гидрофон 1 (Г1), представляющий собой сферу из керамики ЦТС диаметром 15 мм, закреплен рядом с излучателем И1 в области правого наружного слухового прохода. Гидрофон 2 (Г2), представляющий собой керамический (ЦТС) цилиндр диаметром 2 мм и высотой 3 мм, закреплен на правой части лобного выступа приблизительно на одинаковом расстоянии от дыхала и переднего конца лобного выступа. Гидрофон 3 (Г3), точно такой же как гидрофон 2, расположен на переднем конце лобного выступа в том месте, где он переходит в рострум. Излучатели подключены к генератору шума, а гидрофоны ко входам трехканального магнитофона. Генератор шума и магнитофон закреплены на спинном плавнике дельфина. Управление включением генератора шума и магнитофона осуществлялось по подводному радиоканалу с помощью командных радиосигналов длительностью около 1 с.

Во второй части эксперимента два излучателя когерентного шума (И1, И2) были расположены на нижней челюсти животного слева и справа, третий излучатель (И3) — на лобном выступе точно посередине между дыхалом и рострумом. Гидрофон 1 расположен рядом с излучателем И1, гидрофон Г2 — на лобном выступе с левой стороны (симметрично расположению гидрофона 2 на рис. 1), гидрофон Г3 на том же месте, что и в первом случае (как на рис. 1).

Схема эксперимента показана на рис. 2. Дельфин находился в бассейне размером 12,5×6×1,2 м. Стартовая позиция дельфина показана пунктирной областью. В точке 1 дельфину предъявлялась рыба, подвешенная на тонкой нити. Предъявление осуществлялось с громким плеском, который служил стартовым сигналом. С этого момента дельфин начинал движение к рыбе, которую в это время бесшумно передвигали на 2,5—3 м в сторону, в точку 2. Так как эксперимент проводился в полной темноте, дельфин вынужден был практически непрерывно пользоваться эхо-локацией. Расстояние между стартовой позицией дельфина и местом предъявления рыбы составляло 9—10 м. Приблизительно на половине пути дельфина между стартовой позицией и местом предъявления рыбы включали широкополосный акустический шум, излучаемый упоминавшимися выше излучателями, закрепленными на голове дельфина. Спектр шума постоянный в диапазоне частот от 5 до 30 кГц, на более высоких частотах спадающий по закону 6—7 дБ на октаву. Уровень шума по давлению в общей полосе частот  $120 \pm 6$  дБ.

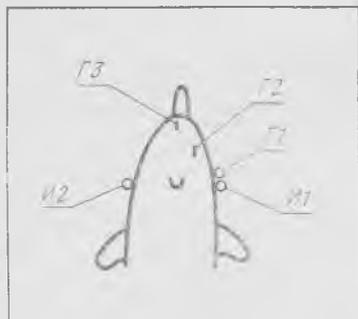


Рис. 1. Схема расположения излучателей шума и гидрофонов на голове дельфина в первой части эксперимента

Объяснения см. в тексте



Рис. 2. Схема эксперимента

Объяснения — см. в тексте

Реакция дельфина на включение шума определялась двумя способами: во-первых, визуально по изменению траектории светящегося трассера, во-вторых, по изменению эхо-локационной активности.

В первой части эксперимента, когда шум предъявлялся в области наружных слуховых проходов, наблюдалась четкая двигательная реакция в виде резкого изменения траектории трассера. Дельфин вздрагивал при включении шума. Иногда такие эксперименты проводились в дневное время (при хорошем освещении) и было отчетливо видно, как при включении шума дельфин в первые секунды резко двигал головой, пытаясь освободиться от мешающего действия шума, но затем быстро успокаивался. Во второй части эксперимента, когда шум предъявлялся в области нижней челюсти и лобного выступа, никакой двигательной реакции отмечено не было. Аналогично обстояло дело и с эхо-локационной активностью.

В отсутствие шума дельфин пользуется для обнаружения подводных предметов, в том числе и рыбы, главным образом стереотипными импульсами, подобными изображенному на рис. 3, А. Форма импульсов может варьировать в некоторых пределах (Романенко, 1974), но в среднем все импульсы близки по форме и имеют спектр. В литературе такая форма импульса считается очень устойчивой по отношению к меняющимся условиям экспе-

римента, в частности к появлению помехи, излучаемой отдаленными источниками. Анализируя немногочисленные и во многом противоречивые литературные данные о способности дельфинов изменять спектр эхо-локационных импульсов в процессе адаптации к изменившимся условиям, Н. А. Дубровский в своем превосходном обзоре (1975) делает вывод: «В результате мы пришли к мнению, что у дельфинов в условиях бассейна отсутствует целенаправленная подстройка спектрального состава эхо-локационного импульса».

Наши эксперименты с предъявлением когерентного шума в область наружных слуховых проходов дали совершенно неожиданный результат. В момент предъявления шума дельфин осуществляет в течение весьма короткого времени (200—300 мс) значительную перестройку спектра импульсов в плане значительного его сужения. Импульс преобразуется из стереотипного или близкого к таковому в колебательный (см. рис. 3, *B*). Такая перестройка систематически регистрируется гидрофоном 3, установленном вблизи рострума, при предъявлении шума в области наружных слуховых проходов. Еще более неожиданным оказался факт: импульсы, регистрируемые гидрофоном 2 (на рис. 1), остаются стереотипными, несмотря на то, что идут синхронно с импульсами, регистрируемыми гидрофоном 3. Однако стереотипные импульсы, регистрируемые гидрофоном 2, при включении шума значительно возрастают по амплитуде (в 2,5—3 раза), тогда как импульсы, регистрируемые гидрофоном 3, изменяясь по спектру, остаются неизменными по амплитуде. На рис. 4, *A* показано распределение амплитуд импульсов во времени, принятых гидрофоном 2 а на рис. 4, *B* — принятых гидрофоном 3. По вертикальной оси — полусумма амплитуд положительной и отрицательной части импульсов, в относительных единицах, по горизонтальной оси — номера импульсов от начала до конца серии. В момент времени, показанный стрелкой, включен шум. Характерно, что значительных изменений частоты следования импульсов в момент включения шума не отмечено.

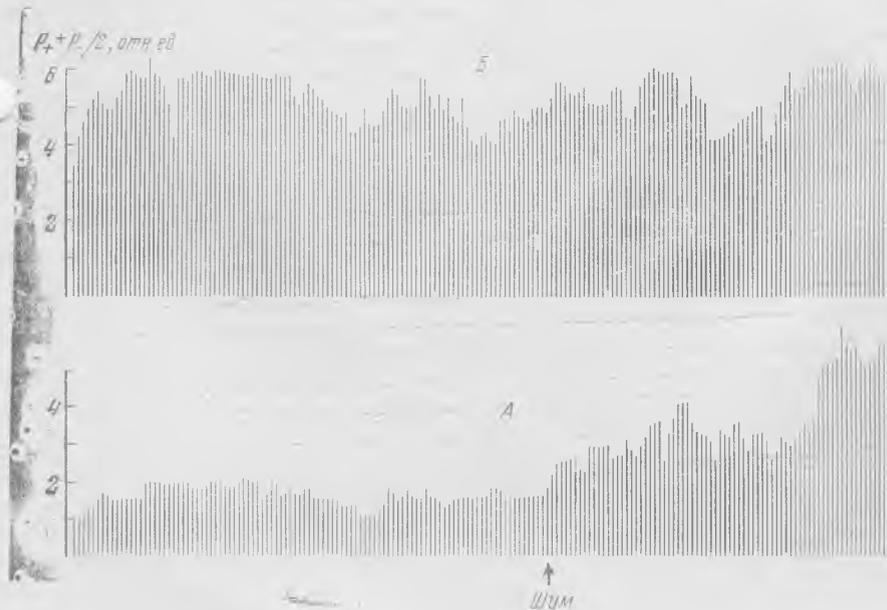
Еще один интересный факт. Импульсы, излучаемые дельфином при наличии шума, иногда имеют «предвестники», отмечавшиеся ранее Г. Л. Заславским (1974) и Н. А. Дубровским (1975). Правда, достоверно установлено пока наличие перед импульсами только по одному «предвестнику». Величина «предвестника» изменяется в широких пределах и иногда может достигать величины основного импульса: импульс становится двойным. Однако длительность «предвестника» при этом остается несколько меньшей длительности основного импульса. На рис. 5 показаны два импульса (*A*, *B*), зарегистрированные гидрофоном 3 при наличии шума. Характерно, что в таком случае предвестники наблюдаются и у соответствующих импульсов, зарегистрированных гидрофоном 2. На том же рисунке показаны импульсы (*B*, *Г*), зарегистрированные гидрофоном 2 и соответствующие импульсам *A* и *B*.

Рис. 3. Форма эхо-локационных импульсов при отсутствии шума (А) и с шумом (Б)



Рис. 4. Распределение амплитуд импульсов до включения

А — импульсы, зарегистрированные гидрофоном 2; Б — то же, гидрофоном 3



При анализе приведенных выше результатов могут возникнуть сомнения следующего характера: во-первых, способен ли вообще гидрофон 3 регистрировать широкополосные и стереотипные импульсы, во-вторых, не является ли резкое отличие импульсов, регистрируемых гидрофоном 3, от импульсов, регистрируемых гидрофоном 2, следствием сложности картины звукового поля вблизи источника, и, в-третьих, не объясняется ли постоянство амплитуды импульсов, регистрируемых гидрофоном 3, и их форма перегрузкой канала регистрации, к которому подключен гидрофон. Иллюстрация, приведенная на рис. 6, по-видимому, ответит на перечисленные сомнения. На этом рисунке импульс *A* зарегистрирован гидрофоном 3 приблизительно за 1 с до включения шума, а импульс *B* принадлежит той же серии импульсов, что и импульсы, приведенные на рис. 3, *B* и 5, *A*, *B* и зарегистрированные приблизительно через полсекунды после включения шума. Амплитуда же импульса *B* на рис. 6 вдвое меньше амплитуды приведенных ранее импульсов (вертикальный и горизонтальный масштабы на всех рисунках один и тот же). На том же рис. 6, *B*, *Г* приведены импульсы, зарегистрированные гидрофоном 2 и соответствующие импульсам *A* и *B*. Попутно обратим внимание на то, что импульсы, излучаемые дельфином до включения шума и после, отличаются по длительности: импульсы, излучаемые после включения шума, существенно длиннее. Кроме того, длительность импульсов, регистрируемых гидрофоном 3, отличается от длительности импульсов, регистрируемых гидрофоном 2, причем последняя практически не зависит от включения шума. Коротко резюмируя сказанное выше, можно отметить, что: при включении шума амплитуда импульсов, регистрируемых гидрофоном 3, остается практически неизменной, тогда как форма (спектр) и длительность значительно изменяются; амплитуда импульсов, регистрируемых гидрофоном 2, значительно изменяется, а форма и длительность практически остаются неизменными. Напрашивается одно объяснение изложенным фактам: импульсы, излучаемые вперед и в стороны (в описываемом эксперименте), генерируются двумя разными источниками, работа которых каким-то образом синхронизирована. Этот вывод водкрепляется еще и таким фактом: иногда в боковом направлении (гидрофоном 2) регистрируются одновременно и стереотипный и колебательный импульсы, синхронизированные по частоте следования, но сдвинутые по времени и по этой причине наблюдаемые раздельно. Приведенные результаты в общих чертах согласуются с данными В. И. Маркова и И. С. Прохорова (см. настоящий сборник), полученными при регистрации звуков дельфина в дальнем поле.

Во второй части эксперимента, когда излучатели шума были закреплены на нижней челюсти и лобном выступе дельфина, практически никаких значительных изменений в эхо-локационной активности отмечено не было. Импульсы как до включения шума, так и после мало отличались от стереотипных (в точках

бо заметной серии импульсов (внутри дыхала) и той же серии эхо-локационных импульсов, зарегистрированной на голове дельфина вблизи роострума.

Следует еще раз подчеркнуть, что все описанные выше «технологические звуки» зарегистрированы в правом носовом проходе

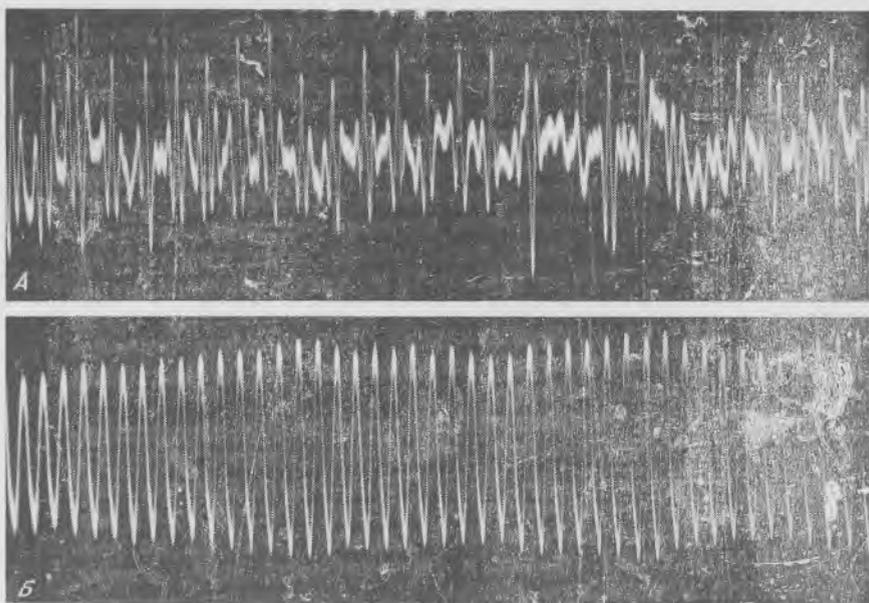


Рис. 10. Осциллограмма технологического (А) и коммуникационного (В) звука

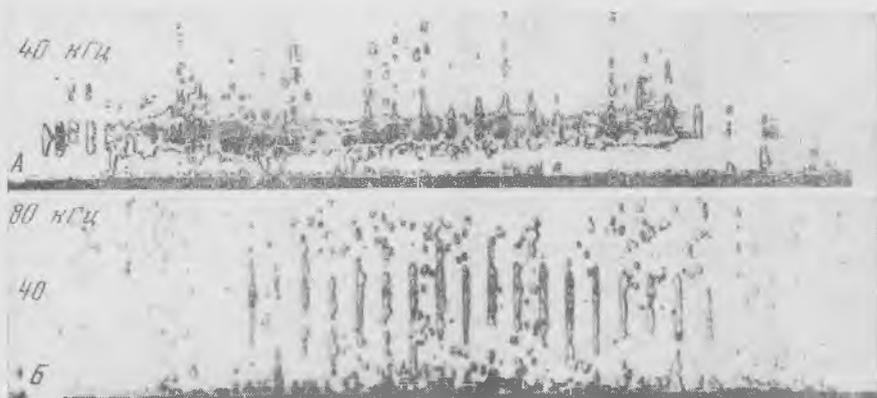


Рис. 11. Сонограмма «технологического» звука на фоне серии импульсов (А) и та же серия импульсов (В), зарегистрированная на голове дельфина

де. В левом носовом проходе никаких звуков не обнаружено. К сожалению, не было возможности предпринять многократных попыток регистрации звука в левом носовом проходе, чтобы достоверно выяснить, слышны ли там технологические звуки во время эхо-локации. Те немногочисленные данные, которыми мы располагаем, позволяют сделать лишь предварительный вывод о том, что область левого носового прохода ниже мускульной пробки не имеет отношения к эхо-локации, тогда как правый носовой проход, несомненно, имеет.

Попытаемся проанализировать природу технологических звуков. Практически все технологические звуки, зарегистрированные нами, по времени совпадают с процессом эхо-локации. Лишь в двух случаях из 17 технологические звуки не сопровождалась эхо-локацией (возможно, она была очень слабой и не прослушивалась). Еще в двух случаях из тех же 17 во время эхо-локации не прослушивались технологические звуки (возможно, были очень слабыми и поэтому не прослушивались). Длительность технологических звуков не совпадает с длительностью эхо-локационных серий, она, как правило, меньше.

Не исключено, что технологические звуки имеют аэродинамическую природу и сопровождают процесс передувания воздуха в структурах, ответственных за генерацию эхо-локационных звуков. Возможно и другое объяснение. Технологические звуки могут свидетельствовать о значительной разнице давлений по разные стороны мускульной пробки и генерируются, когда воздух «травится» через мускульную пробку. На истинную их природу могут пролить свет дальнейшие исследования. В настоящее же время наличие этих звуков так или иначе свидетельствует в пользу гипотезы о пневматическом механизме генерации звуков дельфина.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Гуревич В. С. 1972а. Морфофункциональное исследование надчерепных дыхательных путей обыкновенного дельфина.— В сб. «Применение математических методов и вычислительной техники в медицине и биологии». Л.
- Гуревич В. С. 1972б. О возможном взаимодействии гортани и надчерепных носовых структур в звукообразовании у зубатых китообразных.— 5-е Всес. совещ. по биологии морских млекопитающих. Махачкала.
- Дубровский Н. А. 1975. Эхолокация у дельфинов (обзор). Л., ЦНИИ «Румб».
- Заславский Г. Л. 1974. Экспериментальное исследование пространственно-временной структуры эхолокационных сигналов дельфина. Дисс. на соиск. уч. ст. канд. физ.-мат. наук. Карадаг.
- Романенко Е. В. 1972. Ближнее акустическое поле дельфина афалины.— 5-е Всес. совещ. по биологии морских млекопитающих. Махачкала.
- Романенко Е. В. 1974. Физические основы биоакустики. М., «Наука».
- Романенко Е. В., Чикалкин В. А. 1974. Магнитофон для подводной записи.— В сб. «Морфология, физиология и акустика морских млекопитающих». М., «Наука».
- Diercks K. J., Trocht R. T., Greenlaw C. F., Evans W. E. 1971. Recording and analysis of dolphin echolocation signals.— JASA, v. 49, 6, pt 1.