

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

ЗООЛОГИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ

Том LI

(ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК)

11

МОСКВА · 1973

**ЗВУКОВЫЕ СИГНАЛЫ В БЛИЖНЕМ ПОЛЕ АФАЛИНЫ
(*TURSIOPS TRUNCATUS*, DELPHINIDAE)**

Е. В. РОМАНЕНКО

*Институт эволюционной морфологии и экологии животных
Академии наук СССР (Москва)*

Зарегистрированы эхолокационные сигналы непосредственно на голове дельфина афалины с помощью специально разработанного магнитофона для подводной записи и миниатюрных гидрофонов. Вся регистрирующая система (гидрофоны и магнитофон) была укреплена на дельфине. Форма эхолокационных сигналов свидетельствует о нерезонансном механизме их генерации. Предложена принципиальная схема формирования импульсов, распространяющихся в направлении лоцируемого объекта. Сделан вывод о том, что вестибулярные воздушные мешки и гортань не участвуют в генерации эхолокационных сигналов.

Биоакустика дельфинов включает в себя ряд аспектов: механизмы излучения и приема звука, формирования направленности, распознавания звуковых образов, передачи информации и обеспечения помехозащищенности систем локации и коммуникации и др. Все перечисленные аспекты неразрывно связаны друг с другом и поэтому полное изучение одного из них невозможно без знания других.

В настоящее время биоакустику дельфинов интенсивно изучают за рубежом и в нашей стране. Однако не всем вопросам уделяется достойное внимание. Одним из наименее изученных вопросов остается механизм излучения звуков дельфинами. К настоящему времени основной объем сведений о механизме излучения накоплен в результате морфологических и морфо-функциональных исследований, а также в результате изучения дальнего звукового поля дельфинов (см., например, Яблоков и др., 1972). Эти работы дают лишь косвенные данные о механизме излучения, тогда как достоверные сведения о нем могут быть получены только в результате прямых измерений параметров звуковых сигналов и структур, их излучающих.

Характерной особенностью общепринятой в настоящее время экспериментальной методики исследования звукоизлучения дельфинов в неволе является то, что изучается преимущественно дальнее поле излучения. Такая методика позволяет определить ряд важных параметров акустического поля дельфина. Однако как только речь заходит о механизме излучения и формирования звуковых сигналов, эта методика не может считаться достаточно корректной. Дело в том, что дальнее звуковое поле формируется не только самим дельфином, но и средой, в которой распространяется звук. Звуковые сигналы, излученные и сформированные дельфином, при распространении в ограниченном пространстве изменяются в результате совместного действия таких факторов, как близость свободной границы раздела вода — воздух, интерференция прямых и отраженных сигналов, рефракция, дисперсия скорости звука. В итоге гидрофон регистрирует звуковой сигнал, который иногда весьма отдаленно напоминает первоначально излученный. Правильное

заклучение о механизме излучения может быть сделано лишь на основе данных об истинной форме излученных сигналов. Форма сигналов, близкая к истинной, может быть зарегистрирована лишь в непосредственной близости от предполагаемого источника звука — в ближнем поле источника, под которым мы понимаем здесь поле на расстоянии от источника, измеряемом единицами длин волн (или импульсов).

В настоящее время известна только одна работа (Diercks et al., 1971), в которой предпринята попытка регистрации звуковых сигналов непосредственно на голове дельфина. Результаты работы интересны, но немногочисленны и не позволяют сделать решающих выводов о механизме генерации звука дельфинами. Методика измерений (передача информации с дельфина на берег к регистрирующей аппаратуре по проводам) исключает свободное поведение животного и затрудняет процесс измерений.

В наших исследованиях была применена методика, основанная на использовании автономной регистрирующей аппаратуры, закрепляемой на самом дельфине. Такая методика позволяла работать со свободно плавающим дельфином и существенно облегчала регистрацию сигналов. Она сводилась к следующему. Три миниатюрных широкополосных гидрофона закрепляли с помощью присосок на голове дельфина в области предполагаемого расположения звукоизлучающих органов (рис. 1, I). Сигналы с гидро-

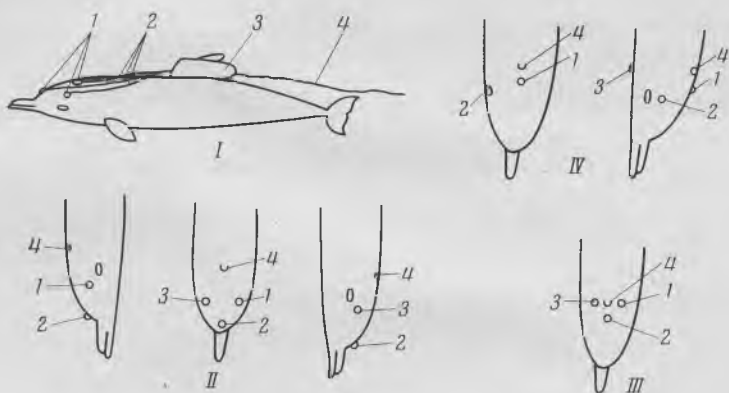


Рис. 1

I — схема размещения регистрирующей аппаратуры на дельфине (1 — миниатюрные гидрофоны, 2 — экранированные провода, 3 — магнитофон для подводной записи, 4 — антенна дистанционного управления); II — 1-я схема расположения гидрофонов на голове дельфина (1 — гидрофон № 1, 2 — гидрофон № 2, 3 — гидрофон № 3, 4 — дыхало); III — 2-я схема расположения гидрофонов на голове дельфина (1 — гидрофон № 1, 2 — гидрофон № 2; 3 — гидрофон № 3; 4 — дыхало); IV — 3-я схема расположения гидрофонов на голове дельфина (1 — гидрофон № 1, 2 — гидрофон № 2, 3 — гидрофон № 3, 4 — дыхало)

фонов поступают по экранированным проводам на входы трехканального магнитофона и регистрируются в полосе частот от 100 гц до 100 кгц. Трехканальный магнитофон был специально сконструирован и изготовлен в малогабаритном, экономичном и автономном варианте и крепился непосредственно на дельфине — на его спинном плавнике. Запись производили под водой при свободном плавании дельфина в ограниченной акватории. Работой магнитофона управляли по радио.

Цель эксперимента — выяснение амплитуды и формы звуковых сигналов в различных точках на поверхности головы дельфина. Для этого использовали 3 схемы расположения гидрофонов.

В первой схеме (рис. 1, II) гидрофоны № 1 и № 3 регистрируют звуки, излучаемые влево и вправо от продольной оси дельфина. Гидрофон № 2 — звуки, излучаемые вперед. Расстояние между гидрофонами № 1 и № 2, а также гидрофонами № 2 и № 3 — 15 см по поверхности тела.

Во второй схеме (рис. 1, III) гидрофоны № 1 и № 3 расположены непосредственно над вестибулярными воздушными мешками дыхательной системы. Гидрофон № 2 — впереди дыхала на расстоянии 7—8 см.

В третьей схеме (рис. 1, IV) гидрофон № 1 располагался впереди дыхала на расстоянии 7—8 см, гидрофон № 3 — в области гортани дельфина, гидрофон № 2 — на боковой части лобного выступа с правой стороны.

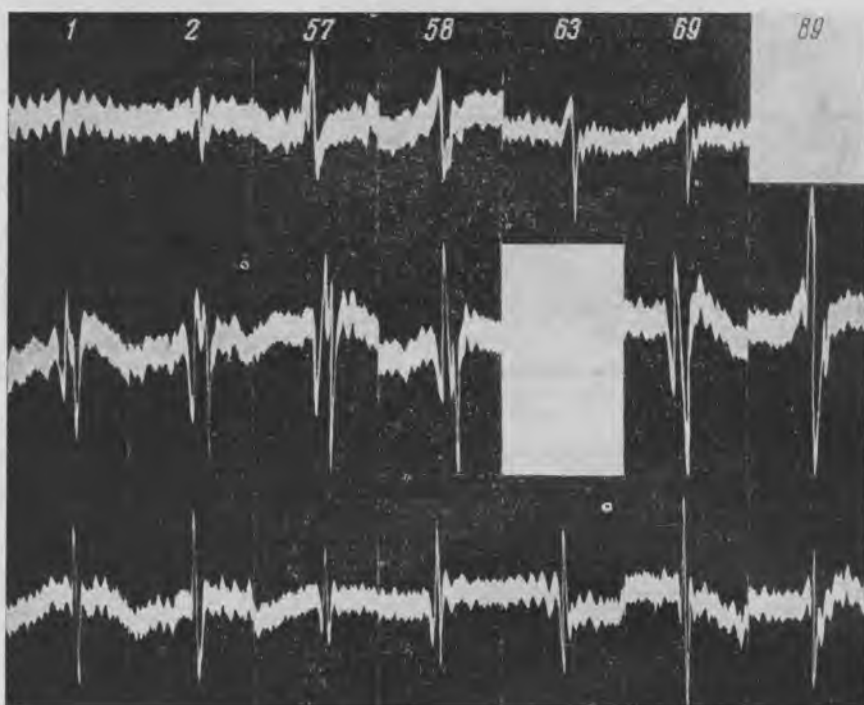


Рис. 2. Эхолокационные импульсы дельфина

На рис. 2 показаны звуковые импульсы из одной и той же эхолокационной серии, зарегистрированные при расположении гидрофонов по 1-й схеме (рис. 1, II). Импульсы верхнего, среднего и нижнего рядов зарегистрированы гидрофонами № 1, 2 и 3 соответственно. Приведены не все импульсы серии, число которых достигает примерно 90. Номера, характеризующие положение импульсов в серии, показаны сверху. Два импульса, отсутствующие на рис. 2, не зарегистрированы по техническим причинам. Легко заметить, что форма импульсов в пределах одной серии не остается неизменной. Импульсы, распространяющиеся вперед (принятые гидрофоном № 2), длиннее импульсов, излучаемых в боковых направлениях, и имеют более сложную форму. Кроме того, начальная фаза импульсов, принятых гидрофоном № 3 (нижний ряд), изменяется в широких пределах. Фаза импульсов № 2 и № 58 отличается примерно на 90° , а импульсов № 2 и № 63— на 180° .

В результате измерений при расположении гидрофонов по 2-й схеме установлено, что гидрофон № 2 регистрировал импульсы и свистовые сигналы дельфина, в то время как гидрофон № 1 регистрировал лишь свистовые сигналы, а гидрофон № 3 не регистрировал никаких сигналов.

В результате эксперимента при расположении гидрофонов по 3-й схеме (рис. 1, IV) установлено, что гидрофоны № 1 и 2 регистрируют импульсные и свистовые сигналы, тогда как гидрофон № 3 никаких сигналов не регистрирует. Этот эксперимент был проведен трижды с различными гидрофонами (миниатюрными цилиндрическими и плоскими с максимальным размером, не превышающим 5 мм) с неизменным результатом.

Обсуждение результатов мы начнем с попытки объяснить очень интересный факт, заключающийся в том, что импульсы, излучаемые в боковых направлениях, короче импульсов, распространяющихся вперед.

Импульсы, распространяющиеся в боковых направлениях, по нашему мнению, короче, так как они не удлиняются и не искажаются за счет

отраженных импульсов, ибо в боковых направлениях кости черепа не отражают (или почти не отражают) звука. По этой причине импульсы, излучаемые в боковых направлениях, по-видимому, наиболее близки по форме к истинным генерируемым импульсам. Анализ формы именно боковых импульсов (излучаемых в боковых направлениях) позволяет сделать вывод о нерезонансном механизме генерации эхолокационных сигналов. В связи с этим представляется маловероятным участие воздушных мешков, как резонаторов, в процессе излучения эхолокационных сигналов.

Однако поскольку гипотеза резонансного механизма излучения у дельфинов довольно прочно вошла в литературу (Lilly, Miller, 1961), мы сочли целесообразным поставить специальный модельный эксперимент по выяснению характера излучения резонансной воздушной полости в воде при ее ударном возбуждении.

В качестве резонансной воздушной полости был взят воздушный шарик, выдутый из тонкой резины, диаметром около 3 см и почти сферической формы. Для того чтобы ударно возбудить такой шарик, внутрь него был помещен другой резиновый шарик меньшего диаметра, выдутый так же, как и первый. В месте завязки большого шарика воткнута швейная игла, предназначенная для прокалывания внутреннего шарика. Всю систему помещали в воду на глубину 25—30 см (аквариум размером 200×50×50 см) и располагали миниатюрный широкополосный гидрофон на расстоянии 7—10 см от шарика. В момент прокалывания внутреннего шарика в большем шарике давление резко возрастает. При этом в воду излучается акустический импульс, регистрируемый тем же гидрофоном и записываемый на тот же магнитофон, на который записывались локационные импульсы дельфина.

На рис. 3, 1 показана фотография излученного импульса. Отчетливо виден затухающий колебательный характер импульса. Причем подчер-

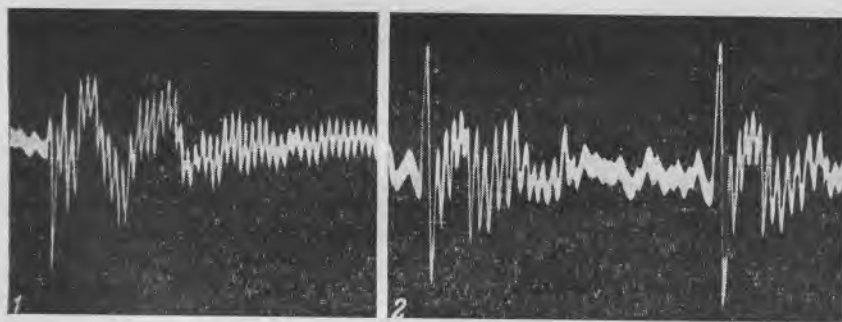


Рис. 3. Импульс, излученный резонансной полостью (1), и звуковой импульс белуги (2)

квиваются 2 частоты: примерно 250 гц и 4—5 кгц. Первая частота излучается при колебании шарика, как резонансной системы с сосредоточенными параметрами: масса — присоединенная масса воды, упругость — воздух внутри шарика. Вторая частота возникает при колебаниях воздуха внутри шарика, как в жесткой сфере. Наличие таких колебаний обусловлено большой разницей акустических сопротивлений воды и воздуха.

Для сравнения на рис. 3, 2 показана фотография звукового импульса, излучаемого белугой *Huso huso* (Романенко, Протасов, 1963; Никольский и др., 1967). Можно отметить заметное сходство импульсов. Белуга относится к числу рыб, имеющих плавательный пузырь, и вероятный

механизм излучения ею звуков, по-видимому, связан с ударным возбуждением плавательного пузыря.

С другой стороны, очевидна разница в форме эхолокационных импульсов дельфина и импульса, излученного ударно возбужденной воздушной полостью. Это подтверждает сделанный ранее вывод о нерезонансном характере излучения дельфина.

Для объяснения формы импульсов, распространяющихся вперед (средний ряд импульсов на рис. 2), можно предложить следующий механизм формирования (рис. 4). Будем считать, что источник эхолокационных импульсов находится в

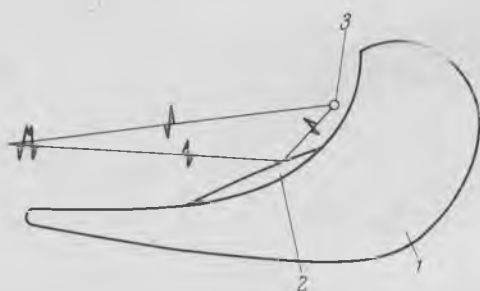


Рис. 4. Схема, поясняющая механизм формирования импульсов

1 — череп, 2 — премаксиллярный мешок, 3 — источник эхолокационных импульсов

области расположения трубчатых воздушных мешков (это предположение не ново, оно неоднократно высказывалось в литературе) и излучает импульсы, подобные изображенным в 3-м ряду рис. 2. Импульсы от источника распространяются во все стороны, в том числе вперед и вниз. Импульсы, излученные вперед и в стороны, распространяются беспрепятственно. Импульсы, излученные вниз, отражаются от премаксиллярных мешков и направляются вперед, суммируясь с импульсами, излученными вперед. На рис. 4

для наглядности показаны только импульсы, распространяющиеся вперед и вниз. Отражение импульса, излученного вниз, от премаксиллярного мешка происходит с поворотом фазы на 180° и с задержкой по времени. При сложении ушедшего вперед импульса с отраженным формируется импульс, похожий на многие из тех (например, № 2), что зарегистрированы гидрофоном № 2. Если излучаются импульсы, подобные импульсу № 58 (в нижнем ряду), то при сложении по описанной схеме формируется импульс, подобный импульсу № 58 (в среднем ряду). Большинство других импульсов имеют форму, переходную от формы импульса № 2 к форме импульса № 58, и могут быть, по-видимому, получены по описанной схеме.

Предложенная схема не может считаться строгой, она лишь поясняет возможный принцип формирования эхолокационных импульсов.

Следует учесть, что источники импульсов может быть не 1, а, по крайней мере, 2, и излучать они могут импульсы, несколько различающиеся по форме, амплитуде и фазе. Кроме того, импульс формируется не только черепом, но и мягкими тканями. Тогда могут получить объяснение различия в форме импульсов верхнего и нижнего рядов, а также дополнительные осложнения формы импульсов среднего ряда (на рис. 2). Несомненно, что для развития и уточнения предложенной схемы необходимы дальнейшие систематические исследования.

Помимо импульсных сигналов, в описанных экспериментах были зарегистрированы также свистовые сигналы, причем их уровень на левой стороне головы дельфина на 12—15 дБ выше, чем на правой. Следует отметить, что подобный результат ранее отмечался Лилли (Lilly, 1962).

Приведенные результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. Излучение эхолокационных импульсов афалиной имеет нерезонансный характер.
2. Эхолокационные импульсы, распространяющиеся вперед, формируются из более простых, непосредственно излучаемых импульсов.
3. Вестибулярные мешки не участвуют в генерации эхолокационных импульсов.
4. Уровень свистовых сигналов дельфина может быть неодинаков на левой и правой стороне головы.
5. Гортаны не являются

излучателем звука у афалины. 6. Примененную методику исследования следует считать перспективной при изучении механизмов генерации и формирования звукового поля дельфинами.

ЛИТЕРАТУРА

- Никольский И. Д., Протасов В. Р., Романенко Е. В., Шишкова Е. В., 1967. Звуки рыб. Атлас, Изд-во «Наука»: 1—95, М.
- Романенко Е. В., Протасов В. Р., 1963. О звуках белуги, *Природа*, 6: 118—120.
- Яблоков А. В., Белькович В. М., Борисов В. И., 1972. Киты и дельфины: 239—242, Изд-во «Наука», М.
- Diercks K. I., Trochta R. T., Greenlaw C. F., Evans W. E., 1971. Recording and analysis of dolphin echolocation signals, *JASA*, 49, 6, pt 1: 1729—1732.
- Lilly J. C., 1962. Vocal behavior of the bottlenose dolphin, *Proc. Amer. Phil. Soc.*, 106: 520—529.
- Lilly J. C., Miller A. M., 1961. Sounds emitted by the bottlenose dolphin, *Science*, 133: 1689—1693.

ACOUSTIC SIGNALS IN THE CLOSE FIELD OF APHALINA

E. V. ROMANENKO

Institute of Evolutionary Morphology and Ecology of Animals, USSR Academy of Sciences (Moscow)

Summary

Echolocational signals were recorded directly on the dolphin head by a specially designed tape-recorder and mini-hydrophones. The whole recording system (hydrophones and tape-recorder) was attached to the dolphin. The form of echolocational signals suggests the non-resonance mechanism of their generation. A principal scheme is proposed for the formation of impulses spreading towards the subject under location. A conclusion is drawn that vestibular air sacs and larynx do not participate in the generation of echolocational signals.
