

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ТОМ X

(ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК)

4

МОСКВА • 1964

АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том X

1964

Вып. 4

ЖУРНАЛ ВЫХОДИТ ЧЕТЫРЕ РАЗА В ГОД

УДК 534.88 : 599.537

О ГИДРОЛОКАЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ ДЕЛЬФИНОВ

ОБЗОР

Е. В. Романенко

Известны примеры, когда у человека появлялись исключительно плодотворные технические идеи в результате наблюдений за живой природой. Так например, живой, наглядный пример птиц способствовал развитию авиации. Однако не всегда история техники развивалась таким образом; часто человек вынужден изобретать то, что в природе существует тысячами. Так случилось с локацией: вначале человек изобрел и создал средства обнаружения (гидро- и радиолокаторы), а уж затем обнаружил, что некоторые животные давно используют эхо-локацию в целях поиска пищи и ориентировки. Человеку остается изучать природные локаторы и заимствовать у них то, что может улучшить технические устройства.

В настоящее время локационная способность достоверно установлена у летучих мышей и китообразных *. Установлено [2, 3], что локационная система летучих мышей по ряду параметров превосходит технические средства обнаружения. Что же касается гидролокационной системы китообразных, в частности дельфинов, то ее оценку еще предстоит произвести.

Вопросу гидролокации у дельфинов посвящена обширная литература в основном американских исследователей [3—27]. В литературе освещены главным образом следующие вопросы:

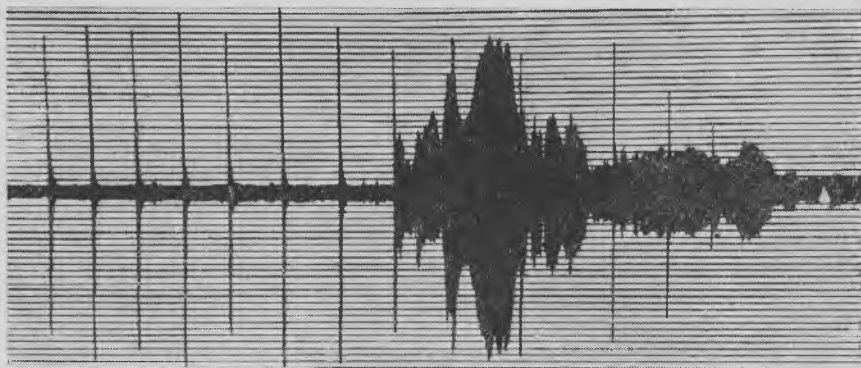
- 1) акустические характеристики звуков,
- 2) доказательство наличия гидролокационной способности,
- 3) помехоустойчивость гидролокационной системы,
- 4) механизм звукообразования и направленность излучения звука,
- 5) бинауральный эффект и частотная зависимость чувствительности слуха дельфинов.

* Недавно зарегистрированы звуки морского льва [1], напоминающие локационные. Однако считать гидролокацию у морского льва достоверно установленной, по-видимому, еще рано.

Акустические характеристики звуков дельфинов

Звуки дельфинов очень разнообразны. Хорошей иллюстрацией этого могут служить спектрограммы звуков белухи (*Delphinopterus leucas*), взятые из работы [4] и представленные на фиг. 1, а—з. Как видно на фиг. 1, звуки могут быть импульсными и непрерывными. Импульсные звуки (фиг. 1, а) состоят из серии импульсов.

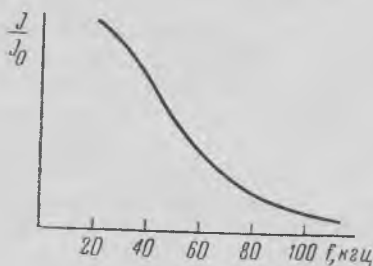
Длительность импульсов измеряется миллисекундами, длительность серии — секундами. Частота повторения импульсов может изменяться от



Фиг. 2

единиц до сотен герц. Некоторые непрерывные звуки воспринимаются как свисты, почти монохроматические (фиг. 1, б), амплитудно (фиг. 1, в) или частотномодулированные (фиг. 1, ж). Другие звуки имеют очень сложный спектр и воспринимаются как скрежет, рев и т. п. (фиг. 1, г, д, е, з). Они могут состоять одновременно из импульсов и свистов.

На фиг. 2 приведена осциллограмма звука дельфина бутылконоса (*Tursiops truncatus*), взятая из работы [5], где видны звуки импульсного и не-

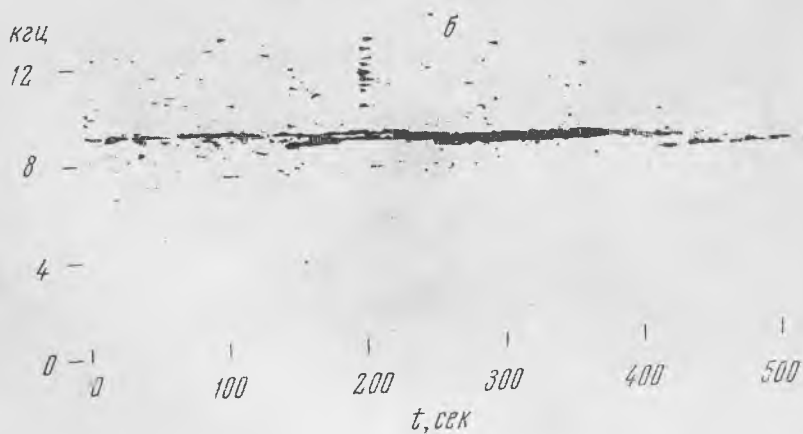
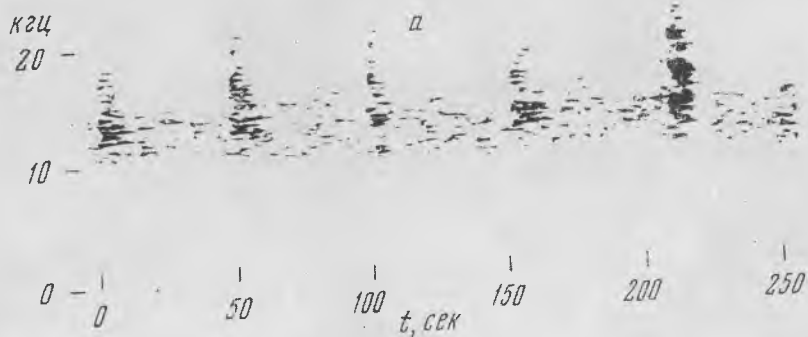


Фиг. 4

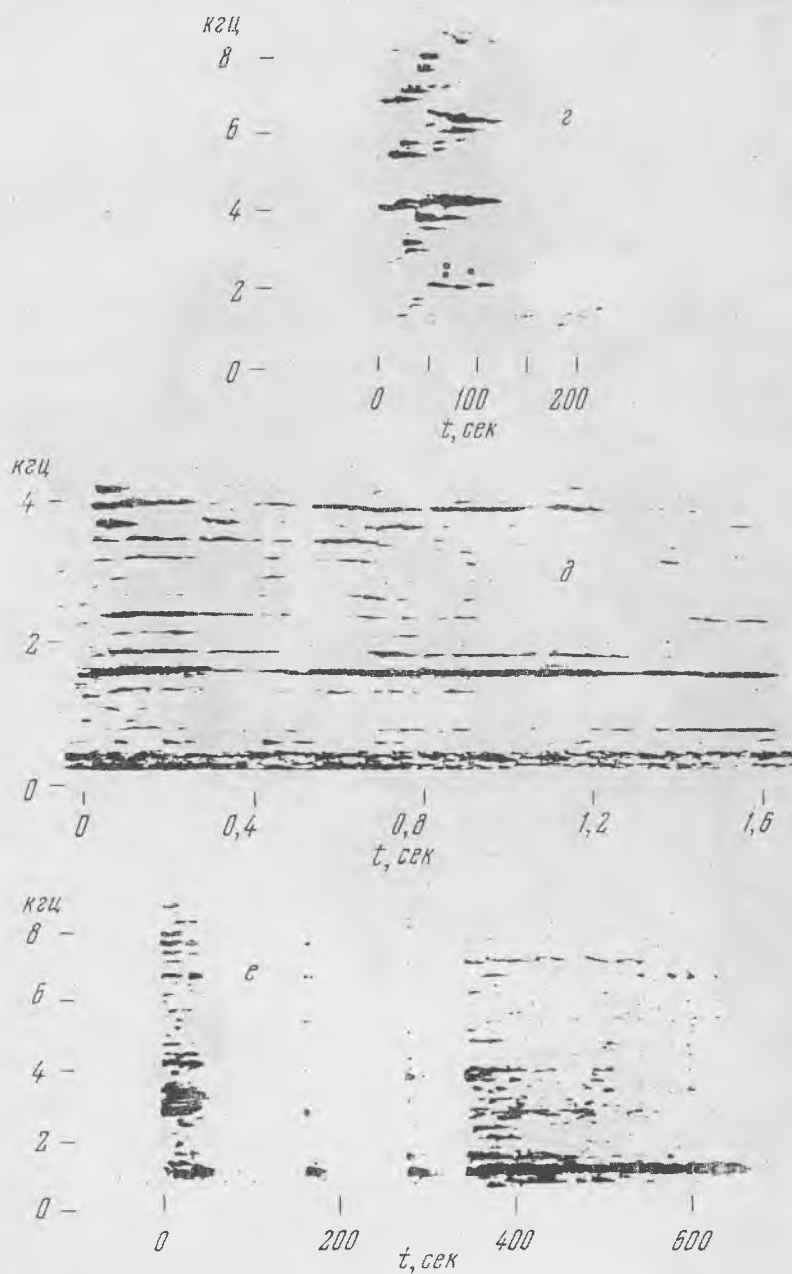
прерывного характера. На фиг. 3 приведена динамическая спектрограмма такого звука, отчетливо показывающая гармонические составляющие непрерывной части звука. Спектры импульсных звуков также очень широки (вертикальные полоски на фиг. 1, а и 3). Звуки типа свистов используются дельфинами для связи между собою; в целях эхолокации используются импульсные звуковые сигналы.

Тот факт, что на фиг. 1 и 3 спектры звуков дельфинов ограничены частотами 20—30 кГц, объясняется конкретными аппаратными возможностями исследователей. Специальные исследования звуков дельфинов с помощью широкополосной аппаратуры (регистрирующей и анализирующей) показывают, что спектр звуков дельфинов простирается до частот порядка 170—200 кГц. Однако по заключению ряда авторов [4—6] большая часть энергии звука дельфинов все же заключена в низкочастотной части спектра (примерно до 30 кГц). Это подтверждается на фиг. 4, где по оси ординат отложена относительная интенсивность звуков в функции частот [6].

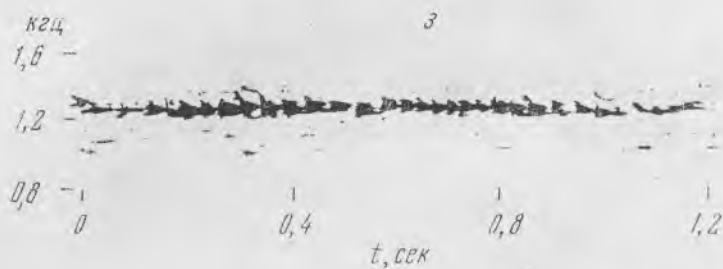
Большим недостатком проведенных до настоящего времени исследований является то, что они дали количественные сведения об абсолютном уровне звуков дельфинов.



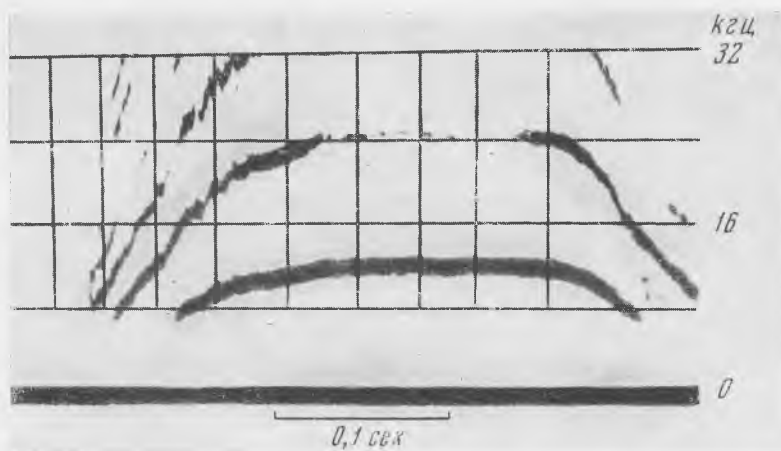
Фиг. 1 а, б, в



Фиг. 1 *а*, *б*, *в*



Фиг. 1 а, б



Фиг. 3

Экспериментальное доказательство наличия гидролокационной способности у дельфинов

Впервые эхо-локационная способность дельфинов была экспериментально продемонстрирована Вильямом Шевиллом и Барбарой Лоуренс [7], которые провели очень интересные наблюдения за дельфинами, содержащимися в отгороженном участке акватории Вудсхолского океанографического института. Бассейн имел размеры $34\text{ м} \times 23\text{ м} \times 2,5\text{ м}$. Объектом исследований служил дельфин весом $203,6\text{ кг}$ и длиной 267 см .

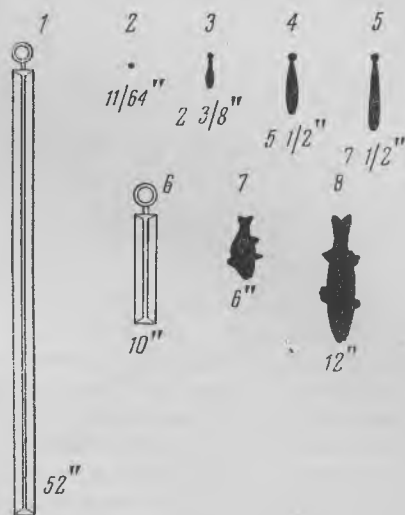
Шевилл и Лоуренс попытались выяснить, может ли дельфин при помощи эхо-локации обнаружить и распознать небольшую мертвую рыбу, и, если может, то на каком расстоянии. Чтобы исключить возможность использования дельфинами зрения в целях поиска рыбы, экспериментаторы часто работали ночью. Кроме того, измерение абсолютного порога видимости в воде в дневное время с помощью диска Секки показало, что мутность воды ограничивает порог видимости расстоянием в 60 см .

Когда кто-либо из экспериментаторов, сидя в лодке, привязанной к берегу, держал в воде неподвижную мертвую рыбу, дельфин приучался приплывать к ней и схватывать ее, издавая при этом звуки, воспринимаемые на слух как поскрипывание. При экспериментах использовались рыбы размером от 8 до 23 см . Чтобы точнее определить расстояние, на котором дельфин еще обнаруживал рыбу, от лодки перпендикулярно берегу была протянута сеть. Сеть простиралась от берега на $2,4\text{ м}$ и уже на несколько большем расстоянии дельфин должен был решить, по какую сторону сети ему плыть к лодке, чтобы найти рыбу. Рыбу опускали в воду попеременно то по одну сторону сети, то по другую, но без правильного порядка чередования. В трех случаях из четырех дельфин правильно выбирал сторону сети, хотя он привык примерно одинаково часто получать рыбу с обеих сторон. Однако если рыбы в воде не было, то даже в темную ночь дельфин почти никогда не подплывал к берегу ближе, чем до конца сети. Если дельфин, проплывая мимо лодки, не издавал звуков, то он не приближался к лодке, даже когда рыба была погружена в воду. Отмечено, что дельфин обнаруживал рыбу с расстояний, как правило, не превышающих 5 м , хотя иногда приплывал брать рыбу и с расстояний около 15 м .

Локационная способность дельфинов была окончательно доказана рядом остроумных опытов, поставленных другими исследователями [8—12].

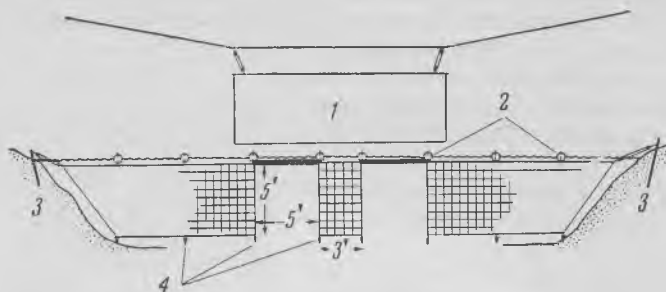
В Морской биологической лаборатории Флоридского университета Келлогом [8—10] была проведена серия опытов по выяснению реакции дельфинов на различные объекты (фиг. 5), погружаемые в воду с громким плеском (дробь, рыба, металлические полосы длиной около $1,2\text{ м}$ и другие), на прямолинейные или каплеобразные предметы, погружаемые в воду без шума и на громкие всплески в воде, производимые на поверхности воды без погружения в воду каких-либо тел.

Опыты проводились в земляном бассейне с размерами $21\text{ м} \times 16,5\text{ м}$ при глубине от $1,65\text{ м}$ до $2,1\text{ м}$ в разных местах. Представление о бассейне дает фиг. 6, взятая из работы [8] и поясняющая постановку из опытов. На этой фигуре: 1 — экран, 2 — поплавки, 3 — берег бассейна, 4 — грузы.



Фиг. 5

Результаты опытов показали, что шум, произведенный в бассейне каким-либо падающим в него телом или льющей (капающей) водой, как правило, сразу же вызывал серию звуковых импульсов у дельфинов. Одна-



Фиг. 6

ко, если даже в бассейне была полная тишина, дельфины издавали серии импульсов каждые 15—20 сек. Как только дельфин обнаруживает появившийся в бассейне предмет, он совершает головой движение из стороны в сторону примерно на 10° , по-видимому, с целью более точного определения направления на предмет.

Реакция дельфинов вызывалась именно шумом, производимым падающими в бассейн предметами, а не их видом, так как видимость в воде бассейна была очень ограниченной (не более 50 см), дельфины же находились на значительно большем расстоянии от места создания шума.

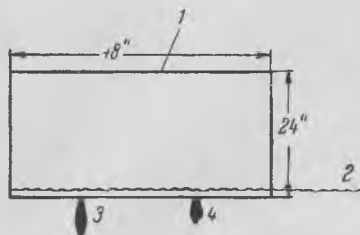
Реакция дельфинов проявлялась не только в виде серий звуковых импульсов, но и в виде попыток приблизиться или, наоборот, удалиться от места, где произведен шум (таблица 1). В описанных опытах дельфины находились на расстояниях не менее 2,4 м и не более 15 м от места создания шума или опускания в воду предмета.

Интересные опыты были проведены тем же исследователем с целью выяснения способности одного из дельфинов распознавать рыб разных размеров гидролокационным способом. Для этой цели две различные рыбки (3 и 4 на фиг. 7) — менее любимая дельфином (*Mugil cephalus*) и более

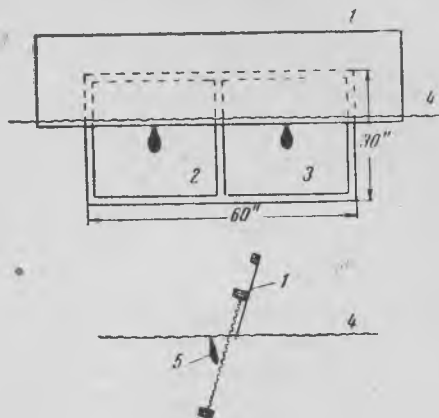
Таблица 1

Предмет	Цвет предмета	Номер предмета на фиг. 5	Способ погружения в воду	Поведение дельфина	
				звуковая реакция	двигательная реакция
Металлич. полоса длиной 1,3 м	оцинкованный металл	1	слышимый	сигналы при погружении	отсутствует или отрицательная (отплывает)
Дробь	черный	2	слышимый	сигналы вслед за всплеском	отсутствует
Деревянные обтекаемые предметы	черный	3, 4, 5	бесшумный	сигналы погружения предмета	отсутствует
Металлич. полоса длиной 25,4 см	оцинкованный металл	6	слышимый и бесшумный	сигналы при погружении предмета	отсутствует
Прозрачный лист из оргстекла 0,9 м × 1,15 м	невидим в воде	—	находится в погруженном состоянии длительное время	сигналы возрастают при сближении с предметом	отрицательная
Съедобная рыба	коричневая и серебристая	7, 8	бесшумн. и слышимый	повторяющиеся сигналы	положительная (приближается)
Плавающий человек	—	—	слышимый	учащающиеся сигналы	отрицательная

любимая (*Leiostomus xanthurus*) погружались бесшумно головой вниз в бассейн за деревянным экраном 1, нижний край которого был погружен на 3—5 см в воду (2 — уровень воды). Экран предназначался для того, чтобы скрыть экспериментатора, который держал рыбок за хвосты, от глаз дельфина. Дельфин при этом находился на некотором расстоянии от места погружения рыб (на расстоянии порядка 1—3 м в разных опытах). Как только дельфин обнаруживал присутствие рыб в бассейне, он сразу же направлялся к ним и брал ту рыбку, которая ему больше нравится (*Leiostomus xanthurus*). В различных опы-



Фиг. 7



Фиг. 8

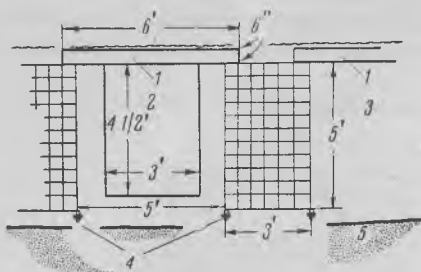
тах рыбок меняли местами. Нелюбимая рыбка выбиралась экспериментатором всегда в два раза больших размеров, чем любимая (размеры рыбок были соответственно 20 и 10 см.) Результаты опытов свидетельствуют о том, что дельфин очень быстро приучался брать только любимую рыбку. В первой серии из 16 опытов он ошибся только 4 раза. В последней серии из 140 опытов, сделанных в полной темноте, не было ни одной ошибки. Во всех опытах, проводившихся даже в дневное время, зрение практически не участвовало в процессе обнаружения рыбок, так как порог видимости рыбок в воде бассейна составлял всего около 25 см. Если рыбки брались одного размера, то дельфин не в состоянии был их различать.

Проводились так же многочисленные опыты по обнаружению дельфином рыбок (5 на фиг. 8), помещенных в воду (4 — уровень воды) за рамкой, в которой было вставлено стекло 2. Дельфин безошибочно выбирал рыбку, которая не была отгорожена от него стеклом 3, и не пытался брать рыбку за стеклом. Назначение экрана 1 такое же, как и на фиг. 7.

Проводились также опыты по обнаружению дельфином различного рода препятствий, располагаемых в бассейне (сети с диаметром нитей около 3 мм, прозрачные листы плексигласа, металлические полосы, располагавшиеся в различном порядке). Некоторые примеры расположения препятствий показаны на фиг. 6 и 9. На фиг. 9: 1 — деревянные бруски, 2 — прозрачное оргстекло, 3 — открытый проход, 4 — грузы, 5 — дно бассейна. При движении в бассейне дельфин избегал препятствий в 98% опытов.

Интересные опыты, проводившиеся в Мериленде в 1959—1960 гг., описаны в работе [12]. Объект исследования — дельфин-бутылконос (*Tursiops truncatus*) был помещен в круглый бассейн диаметром 10,5 м и глубиной 1,65 м. В отличие от описанных ранее экспериментов, в этих опытах исследователи исключили всякую, даже минимальную, возможность использования дельфинами зрения. Глаза дельфина на время опыта закрывались специальными присосками из латекса. Дельфина длительное время приучали носить такие присоски на глазах, пока не добивались того, что дельфин добровольно прилипал на зов исследователей (на звук обычного полицейского свистка) и спокойно ждал, пока ему не поставят на глаза присоски. Опыт заключался в том, что дельфин с присосками на глазах по сигналу исследователей (по свистку или по сигналу в виде чистого

тона частоты 18 кГц, излучаемого в воду) направлялся к рычагу звонка, опущенному в воду, и нажимал на него, как показано на фиг. 10, в результате чего звонил звонок, затем плыл к исследователю за наградой. В качестве награды в воду перед гидрофоном опускался кусок рыбы (макрель) с поперечным сечением около 5 см. В тот момент, когда дельфин приступал к выполнению задания, он начинал издавать поисковые звуки



Фиг. 9

в виде импульсов с частотой повторения около 16 Гц. Примерно за 3—4 м от рыбы, предложенной дельфину в качестве награды, он начинал двигать головой вправо — влево, по-видимому, с целью точнее определить направление на рыбу. Движения головой были особенно заметны, когда дельфин находился на расстоянии около 0,9 м от рыбы. Дельфин очень осторожно брал рыбу, не касаясь гидрофона даже тогда, когда рыба находилась на расстоянии всего 2,5—5 см от гидрофона. За время, пока дельфин подходил к рыбе, частота повторения его звуковых импульсов возрастала и достигала 190 Гц в тот момент, когда дельфин брал рыбу. Затем частота повторения падала до 26—50 Гц.

Авторы работы [12] пытались лишить дельфина возможности пользоваться гидролокацией.

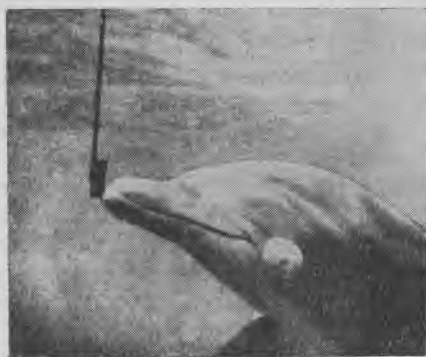
С этой целью они надевали присоски из латекса на органы слуха дельфина. Однако это не дало никаких результатов. Дельфин спокойно продолжал пользоваться гидролокацией. Это означает, что либо заглушки были неэффективны, либо сигнал достигал внутреннего уха дельфина иным путем. Когда же исследователи попытались надеть на голову дельфина маску, закрывающую излучающий участок головы, это вызвало со стороны дельфина бурную реакцию. Дельфин бесновался в бассейне до тех пор, пока не сбрасывал маску.

Описанные опыты с дельфинами вполне доказывают наличие у них гидролокационной способности. Опыты свидетельствуют также и о высоком умственном развитии дельфинов, позволяющем легко дрессировать их, применяя методику условных рефлексов.

Помехоустойчивость локационной системы дельфинов

Специальных исследований помехоустойчивости локационной системы дельфинов до сих пор, по-видимому, не проводилось. Во всяком случае в литературе мало сведений по этому вопросу. Келлог [10] проводил опыты по излучению в бассейн гидролокационных сигналов дельфинов, записанных ранее. Однако, как выяснилось, эти сигналы не оказали заметного мешающего действия на гидролокационную способность находящихся в бассейне дельфинов.

В работе [12] отмечено, что в тот момент, когда дельфин берет рыбу в непосредственной близости от гидрофона, гидрофон регистрирует примерно по 7 отраженных сигналов между двумя излучаемыми сигналами,



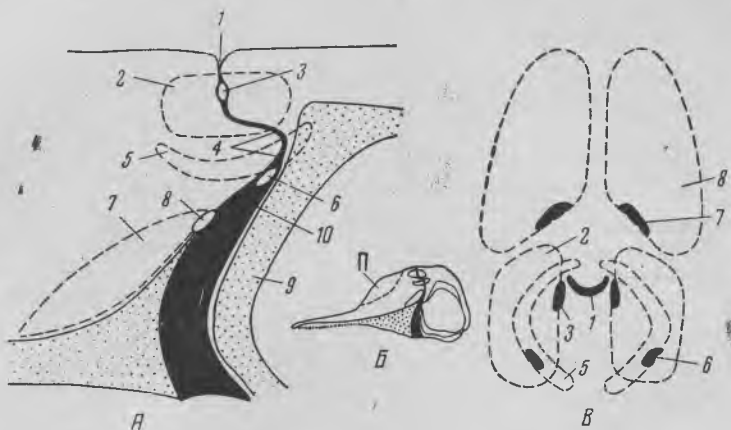
Фиг. 10

что свидетельствует о высоком уровне помех, возникающих вследствие многократных отражений сигналов в бассейне. Тем не менее, дельфин уверенно ориентировался в бассейне и точно брал рыбу.

Эти немногочисленные данные все же свидетельствуют о достаточно высокой помехоустойчивости гидролокационной системы дельфинов.

Механизм звукообразования и направленность звукоизлучения

В процессе излучения звука дельфинами принимают участие воздушные полости (мешки), расположенные в мягких тканях головы над ноздревыми отверстиями черепа. Воздушные полости разных видов зубатых



Фиг. 11

китов изучались с давних пор многими авторами [13—17]. Однако наиболее убедительные доказательства участия дыхательного тракта вместе с воздушными полостями в создании звуков дельфинами даны в работе [13].

У дельфинов имеется три пары воздушных полостей (фиг. 11) [17]:

1. Вестибулярные 2 очень емкие, имеют выход 3 в носовой канал. К стенкам этих полостей прикрепляются несколько радиально расположенных мышц, способных при сокращении выдавливать воздух из полостей.

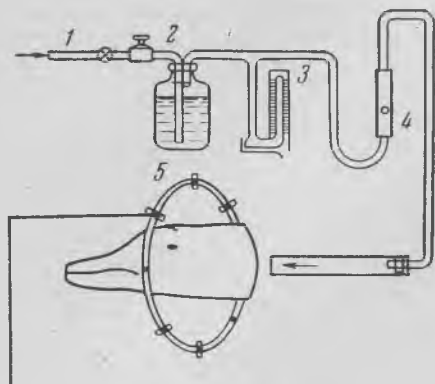
2. Тубулярные 5 на позициях А и В, залегают ниже вестибулярных и имеют форму изогнутых трубок (правой и левой), проходящих по сторонам ноздри. Эти полости соединены отверстиями 6 с носовым каналом ниже основной мускульной пробки 4, запирающей носовой канал.

3. Премаксиллярные 8 залегают на межчелюстных костях 9 и открываются отверстиями 7 в носовой канал у основания 10 мягкой его части.

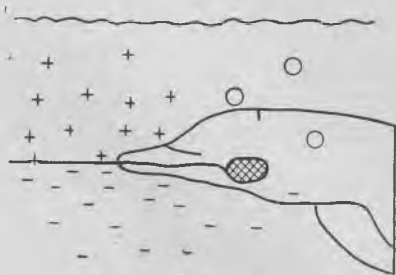
Выяснение роли каждой воздушной полости в механизме звукообразования — сложная задача, которая потребует для своего решения специальных экспериментов. Тем не менее, в работе [13] излагается ряд интересных экспериментов, на которых следует остановиться подробнее.

Авторами работы [13] были проведены опыты с отпрепарированной гортанью и отрезанными головами продельфина и афалины. В задачу входило искусственное образование звуков путем продувания воздуха под давлением через гортань и весь дыхательный тракт с воздушными полостями, его анализ и определение диаграммы направленности. Схема опыта показана на фиг. 12. Измерения проводились в воздушной среде. Сжатый воздух подавался по трубке 1 через редуктор давления 2 и измеритель скорости потока 4 и поступал через стеклянную соединительную трубку в трахею. Измерение давления производилось манометром 3. Давление воздуха изменялось в пределах от 0,07 до 0,14 атм. Как в опытах с гортанью, так и в опытах с головами звуки оказались одинаковыми и сходными со звуками, издаваемыми дельфинами в естественных условиях. Изме-

нение давления подаваемого воздуха и положения гортани вызывало изменение звуков от сложных, богатых гармониками, до свистящих. При продувании воздуха через систему носовых полостей одного из продельфинов получались короткие импульсные звуки, подобные гидролокационным. Были получены также диаграммы направленности для созданных таким образом искусственных звуков в вертикальной и горизонтальной плоскости на расстоянии 38 см от головы. Измерения производились в воздушной среде с помощью конденсаторного микрофона 5. При опытах была обнару-



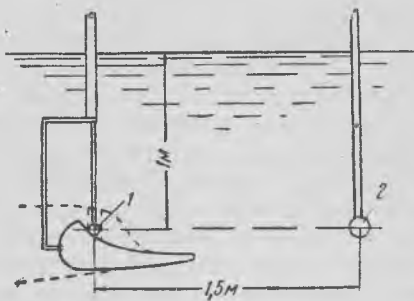
Фиг. 12



Фиг. 13

жена слабая направленность излучения*. Авторы высказали предположение, что направленность излучения звуков дельфинами может быть объяснена, во-первых, фокусирующим действием жировой подушки на лбу дельфина и, во-вторых, фокусирующим действием черепа. На фиг. 11 (А и В) видно, что лобная часть черепа дельфина вогнута и должна, по-видимому, концентрировать звуки, излучаемые воздушными полостями, расположенными в области лобной части. На фиг. 11, В буквой П обозначена жировая подушка. Она должна оказывать определенное влияние на направленность излучения, так как ее акустические свойства отличаются от акустических свойств окружающей среды. Однако никаких экспериментов по выяснению роли жировой подушки и черепа в концентрации звука авторами работы [13] проведено не было. Не исследовалась также и частотная зависимость диаграммы направленности, так как измерялся лишь общий уровень звукового давления без частотного анализа.

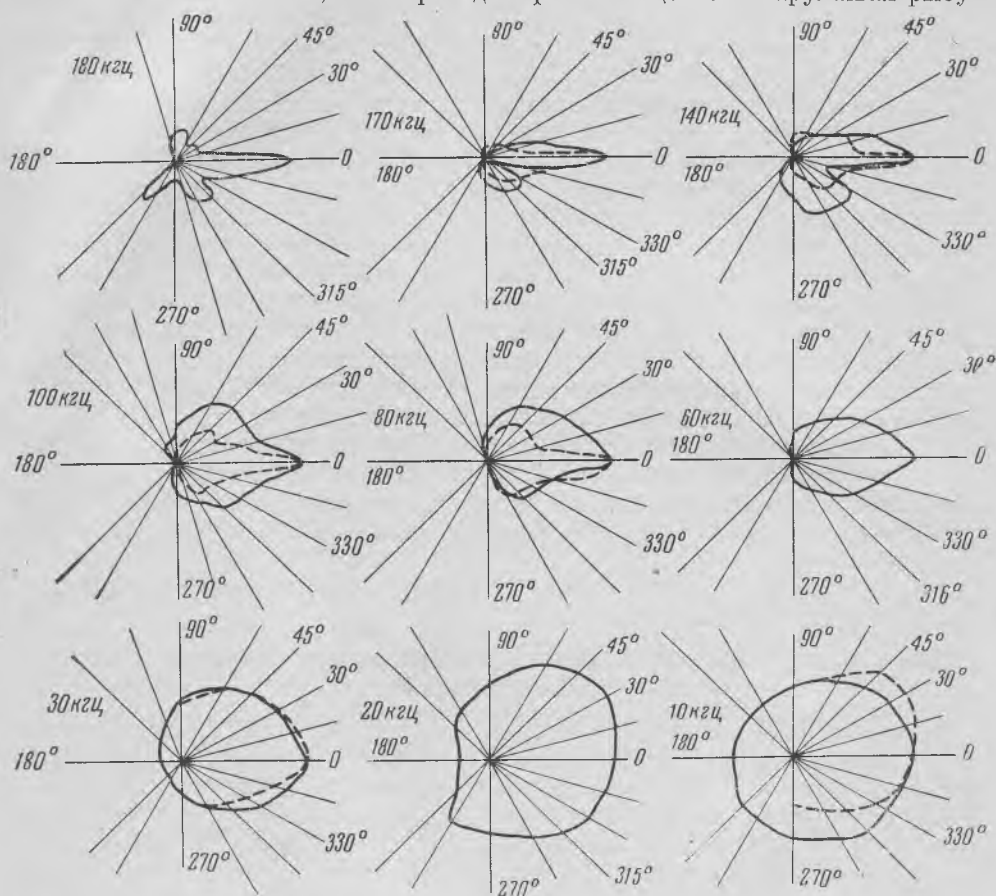
Указание на то, что звуки, излучаемые дельфином, имеют заметную направленность, содержится также в работе [12]. Авторы этой работы регистрировали звуки дельфинов с помощью гидрофона, чувствительного к звуковым колебаниям в узком диапазоне частот в области 100 кГц. Было отмечено, что гидрофон воспринимает звуки дельфина наиболее эффективно, когда голова дельфина направлена строго на гидрофон. О наличии направленности свидетельствуют также движения головы дельфина вправо — влево в то время, когда он направляется к рыбе, о чем уже упоминалось выше.



Фиг. 14

* Отметим, что проведение таких опытов в воздушной среде не может давать решающих результатов. Корректной была бы постановка опытов в воде.

Интересный эксперимент выполнили авторы работы [12]. Они выяснили способность дельфина обнаруживать куски рыбы, располагаемые в различных местах в воде в окрестности его головы. Результаты представлены на фиг. 13, на которой схематически (крестиками) отмечена та область перед головой дельфина, в которой дельфин, лишенный зрения (с присосками на глазах), быстро обнаруживал куски рыбы. Кругочками отмечена область, в которой дельфин не сразу обнаруживал рыбу. Черточками отмечена область, в которой дельфин вообще не обнаруживал рыбу.



Фиг. 15

В работе [17] описан эксперимент, задачей которого было выяснить роль головы дельфина, как возможного концентратора звуковой энергии. Схема эксперимента показана на фиг. 14. Излучателем звука служила сфера (диаметром 1,6 см) из керамики титаната бария 1, которая помещалась в отрезанную голову дельфина в области расположения воздушных полостей. Приемником звука служила сфера 2 из титаната бария диаметром 3 см, расположенная на расстоянии 1,5 м от излучателя, вмонтированного в голову. Голова дельфина с излучателем и приемник звука располагались в воде на глубине 1 м. Диаграмма направленности определялась при вращении головы дельфина относительно вертикальной оси, проходящей через излучатель. Диаграмма направленности излучателя была круговой во всем диапазоне частот, использованном при опытах.

Процесс измерений включал в себя два этапа. На первом этапе исследовалась диаграмма направленности, формируемая целой головой дельфина (череп с мягкими тканями). В этом случае излучатель вводился в го-

лову дельфина через дышло до упора в кости черепа. На втором этапе исследовалась диаграмма направленности, формируемая черепом без мягких тканей. Предварительно череп вываривался и тщательно освобождался от мягких тканей. Излучатель укреплялся в том же месте черепа, что и в предыдущем случае. Режим работы излучателя был импульсным. Длительность импульсов составляла около 1 мсек. Скважность импульсов обеспечивала полное затухание сигналов, отраженных от посторонних предметов.

Результаты измерений показаны на фиг. 15. Сплошными линиями показаны диаграммы направленности для черепа дельфина без мягких тканей на частотах 10, 20, 30, 40, 60, 80, 100, 110, 140, 170 и 180 кГц. Отчетливо видно, что диаграмма направленности заметно сужается при изменении рабочей частоты от низкой к высокой. На частоте 30 кГц диаграмма направленности имеет ширину около 90°. На частоте 180 кГц ширина диаграммы составляет всего около 17°.

Пунктиром показана диаграмма направленности для черепа с мягкими тканями на частотах 10, 30, 80, 140 и 170 кГц. Легко видеть, что диаграммы направленности для черепа без мягких тканей, на частотах 80 кГц и выше примерно в два раза шире диаграмм направленности для черепа с мягкими тканями. Можно сделать тот вывод, что мягкие ткани головы дельфина (жировая подушка и прочее) играют некоторую положительную роль в сужении диаграммы направленности на высоких частотах, хотя основную роль в формировании направленности играет все же череп.

Полезно отметить, что показанные на фиг. 15 диаграммы направленности не следует отождествлять с диаграммами направленности для звуков живого дельфина, так как излучатель, использованный при опытах, существенно отличается от естественных излучателей звука дельфинов (воздушных полостей). Приведенные результаты позволяют лишь качественно оценить некоторые стороны механизма формирования направленности излучения звука дельфинами.

Бинауральный эффект и частотная зависимость чувствительности слуха дельфинов

В работе [18] приведены результаты исследования способности дельфина определять направление на источник низкочастотного звука (3,5 и 6 кГц). При экспериментах использовалась методика условных рефлексив. Было установлено, что дельфин может определять направление на источник непрерывного и импульсного звука с точностью до 16° при частоте звука 6 кГц и 22° при частоте 3,5 кГц. Интересно, что и человек определяет направление на источник звука примерно с такой же точностью. При этом, конечно, учитывается различие сред, в которых находятся дельфин и человек.

О способности дельфинов определять направление на источник звука упоминается в ряде работ [8—12], где отмечается, что дельфин уверенно идет на всплески, создаваемые падающими в воду предметами.

Вопрос о частотной зависимости чувствительности слуха дельфинов в звуковом и ультразвуковом диапазоне частот исследовался рядом авторов [19—21]. Авторами работ [19, 20] установлено, что дельфины слышат ультразвуки в диапазоне частот по крайней мере до 80 кГц.

Однако исследования авторов работы [21] показали, что дельфины слышат ультразвуковые колебания по крайней мере до частоты 153 кГц. Если чувствительность слуха дельфина на частоте 120 кГц принять за единицу, то чувствительность на частоте 153 кГц составляет всего лишь 0,13.

Сравнительная оценка локационных способностей дельфинов, летучих мышей и радиолокаторов

В работе [2] при проведении сравнительной оценки локационной системы летучих мышей и радиолокатора автор ввел в рассмотрение «показа-

тель эффективности» системы, определяемый при $\pi d \gg \lambda$, как R^4 / PWd^2 , где R — дальность обнаружения (см), d — диаметр лоцируемого объекта (см), P — излучаемая мощность (вт), W — вес локационной системы (в граммах), λ — длина звуковой волны (см). Правильнее было бы использовать в выражении для показателя эффективности не диаметр лоцируемого объекта d , а диаметр эквивалентной сферы d_0 , создающей такой же эхо-сигнал, как лоцируемый объект. Дело в том, что не всегда $d \sim d_0$. В некоторых случаях (например, когда лоцируемым объектом является тонкая длинная проволока) $d_0 \gg d$, и тогда оценка эффективности системы по формуле, в которой использовано d вместо d_0 , будет неверной. Мы будем использовать выражение R^4 / PWd_0^2 , связывающее наиболее важные факторы, характеризующие систему. Лучшей локационной системой является та, которая при меньшем собственном весе и меньшей энергии излучения способна обнаруживать цели меньших размеров на больших расстояниях. Другими словами, показатель эффективности тем больше, чем эффективнее локационная система.

В приведенном выше выражении показатель степени у R , равный четырем, определяется тем, что энергия эхо-сигнала от лоцируемого объекта пропорциональна $1/R^4$. Показатель степени у d_0 , равный двум, определяется тем, что энергия эхо-сигнала от препятствий, размеры которых больше длины волны, пропорциональна d_0^2 .

Приведенное выражение для показателя эффективности может быть использовано также и для оценки локационной системы дельфинов. При этом прежде всего необходимо определить порядки величин, входящих в показатель эффективности.

В рассмотренных выше экспериментах объектом локации дельфинов, как правило, была рыба. Во всяком случае, лишь при локации рыбы установлены более или менее точно дальности обнаружения. При экспериментах использовались рыбы размером от 8 до 23 см. Для рыб такого размера $d_0 \cong 3$ см [28].

Расстояние, с которого дельфин направлялся прямо к рыбе и которое может быть названо дальностью обнаружения, в большинстве случаев составляло около 5 м. В работе [7] упоминается, что иногда дельфин направлялся в сторону погруженной в воду рыбы с расстояния около 15 м, но считать достоверно установленным, что дельфин обнаруживает рыбу с расстояния 15 м, по-видимому, нельзя. В работе [22] упоминается, что дельфин способен обнаруживать различные отбросы кораблей с расстояний около 3 км. Однако этого замечания в расчет принимать, по-видимому, нельзя. Если дельфины и подходят к кораблям, чтобы воспользоваться отбросами, то при этом они ориентируются скорее всего на шум корабля. Поэтому, можно принять $R = 5$ м.

Если предположить, что дельфин может воспринимать звук в том же диапазоне интенсивностей, как и человек, т. е. от 10^{-16} вт/см² до 10^{-4} вт/см², то легко показать, что дельфин должен излучать звук мощностью не менее 10^{-4} вт, чтобы эхо-сигнал от рыбы с $d_0 = 3$ см, находящейся на расстоянии 5 м от дельфина, имел интенсивность не менее 10^{-16} вт/см². Таким образом, $P = 10^{-4}$ вт.

Под локационной аппаратурой дельфина следует понимать органы и ткани, имеющие отношение к излучению и приему сигналов. К ним относятся дыхательные пути, легкие, череп, мягкие ткани головы, органы слуха и прочее. Можно принять, что вес локационного аппарата дельфина составляет 5—10% от общего веса всего тела (как это определено для летучих мышей). При общем весе дельфина 100—200 кг, что составит около 10 кг. Таким образом, $W = 10^4$ г.

При этих данных численное значение показателя эффективности локационной системы дельфинов будет равно $7 \cdot 10^9$.

Для сравнения в табл. 2 приведены значения показателя эффективности для радиолокационной станции AN/APS-10, двух видов летучих мы-

шей и дельфина. Данные для станции и летучих мышей взяты из работы [2] * и пересчитаны по формуле R^4/PWd_0^2 . В результате значения показателя эффективности радиолокатора и локатора большой рыжей летучей мыши остались прежними, а показатель эффективности локатора малой рыжей летучей мыши уменьшился на 4 порядка, вследствие того, что для

Таблица 2

	Радиолокатор системы AN/APS-10	Большая рыжая летучая мышь	Малая рыжая летучая мышь	Дельфин на 10^2
Обнаруженная цель	самолет	насекомое	провода диаметром $1,8 \cdot 10^{-2}$ см	рыба
Диаметр эквивалентной сферы d_0 , см	300	1	1,8	3
Дальность обнаружения R , см	$8 \cdot 10^6$	200	90	500
Вес аппаратуры W , г	$9 \cdot 10^4$	1,0	0,5	10^4
Излучаемая мощность P , вт,	10^4	10^{-5}	10^{-6}	10^{-4}
R^4/PWd_0^2	$5,1 \cdot 10^{13}$	$1,6 \cdot 10^{14}$	$4,1 \cdot 10^{13}$	$7 \cdot 10^9$

провода с диаметром $1,8 \cdot 10^{-2}$ см, лоцируемой с расстояния 90 см, $d_0 \approx 10^2 d$.

Сравнение показателей эффективности говорит не в пользу дельфина. Это может означать, что, либо локационная система дельфинов уступает по качеству локационным системам летучих мышей и радиолокаторам, либо параметры локационной системы дельфинов определены неверно. Все же вероятнее всего последнее. Дело в том, что все эксперименты, рассмотренные выше, носят качественный характер и имели целью лишь доказательство наличия локационной способности у дельфинов, но не определение параметров их локационной системы. Анализ результатов, приведенных в табл. 2, позволяет определить условия эксперимента, необходимые для количественного изучения параметров локационной системы дельфинов. Если предположить, что показатель эффективности локационной системы дельфина не хуже, чем у большой рыжей летучей мыши (порядка $1,0 \cdot 10^{14}$), то эксперименты с дельфинами необходимо проводить в бассейне длиной не меньше 100 м. В этом случае размер лоцируемого объекта (размер рыбы) может остаться таким же, как и в описанных выше экспериментах, т. е. $d_0 \approx 3$ см. Уменьшать размер лоцируемого объекта для того, чтобы иметь возможность работать с дельфинами в бассейне размером 10—20 м не целесообразно, так как пришлось бы в качестве лоцируемых объектов использовать молодь рыбы с размерами порядка 1 см.

ВЫВОДЫ

Проведенный обзор литературных сведений о гидролокации дельфинов позволяет утверждать следующее:

1. Дельфины используют гидролокацию в целях поиска пищи и обнаружения препятствий.

2. Локационные сигналы дельфинов имеют широкий спектр в области звуковых и ультразвуковых частот. Большая часть энергии локационных сигналов лежит в диапазоне частот до 30 кГц. Спектр локационных сигналов определяется механизмом излучения звука.

3. Механизм излучения звука дельфинами связан с продуванием воздуха через дыхательные пути и систему воздушных полостей и является, по-видимому, газоструйным.

* В работе [2] показатель эффективности локатора малой рыжей летучей мыши получился равным $4,1 \cdot 10^{17}$, что явно преувеличено.

4. Для проведения точных экспериментов с дельфинами необходим бассейн длиной не менее 100 м и не слишком малой ширины и глубины.

Следует, наконец, отметить, что в литературе совершенно не освещен вопрос о механизме приема дельфинами локационных сигналов и получения ими информации о дальности, размерах и структуре лоцируемого объекта. Имеющихся в литературе данных недостаточно также и для того, чтобы уверенно оценить качество локационной системы дельфинов.

ЛИТЕРАТУРА

1. T. C. Poulter. Sonar signals of the sea lion. Sci., 1963, 139, 3556, 753—755.
2. D. R. Griffin. Echoes of bats and men. New York, 1959.
3. L. I. Cutrona. A comparison of the bat's sonar equipment with built by human engineers. IEEE Int. Conv. Rec., 1963, 11, 3, 167—171.
4. M. P. Fish, W. H. Nowbray. Production of underwater sound by the white whale or beluga, *Delfinopterus leucas* (Pallas). J. Mar. Res., 1962, 20, 2, 149—162.
5. G. C. Lilly, A. M. Miller. Sounds emitted by the bottlnose dolphin. Sci., 1961, 133, 3465, 1089—1093.
6. W. N. Kellog, R. Kohler, H. N. Morris. Porpois sounds as sonar signals. Sci., 1953, 117, 239—243.
7. W. E. Schevill, B. Lawrence. Food-finding by a captive porpoise (*Tursiops truncatus*). Breviora, Mus. Comp. Zool. Harvard, 1956, 53, 1—15.
8. W. N. Kellog. Echo ranging in the porpoise. Sci., 1958, 128, 3330, 982—988.
9. W. N. Kellog. Size discrimination by reflected sound in a bottlnose porpoise. J. Comp. Physiol. Psych., 1959, 52, 509—514.
10. W. N. Kellog. Aditory perception of submarget objects by porpoise. J. Acoust. Soc. America, 1959, 31, 1, 1—6.
11. W. N. Kellog. Porpoises and sonar. The university of Chicago press, 1961.
12. K. S. Norris, J. H. Prescottt, P. V. Asa-Dorian, P. Perkins. An experimental demonstration of echolocation behaviour in the porpoise, *Tursiops truncatus* (Montagu). Biol. Bull., 1961, 120, 2, 163—176.
13. W. E. Evans, J. H. Prescottt. Observation of the sound production capabilities of the bottlenose porpoise: a study of whistls and clicks. Zoologica, 1962, 47, 3, 121—128.
14. С. Е. Клейненберг и А. В. Яблоков. О морфологии верхних дыхательных путей китообразных. Зоол. ж., 1958, 37, 7, 1091—1100.
15. B. Lawrence, W. E. Schevill. Bull. Museum Comp. Anat. (Harvard), 1956, 114, 4, 103—151.
16. H. C. Raven, W. K. Gregory. American Museum Novitates, 1933, 677.
17. Е. В. Романенко. К вопросу о гидроакустике и гидродинамике рыб и дельфинов. Отчет Акустического института АН СССР, Москва, 1963.
18. W. H. Dudok van Heel. Audio-direction finding in the porpoise (*Phocaena phocaena*). Nature, 1959, 183, 4667, 1063.
19. W. N. Kellog. Ultrasonic hearing in the porpoise. J. Comp. Physiol. Psych., 1953, 46, 446—450.
20. W. N. Kellog, R. Kohler. Responses of the porpoise to the ultrasonic frequencies. Sci., 1952, 116, 250—252.
21. W. E. Schevill, B. Lawrence. Auditory response of a bottlenosed porpoise, *Tursiops truncatus*, to frequencies above 100 kcps. J. Exp. Zool., 1953, 124, 147—165.
22. J. H. Harrison. Fish propulsion. Soc. Automotive engineers, Baltimore sectica joint army-navy industry meeting, 1961, S. 307, 1—6.
23. Ph. D. Rehman. Project Notty. The U. S. Naval ordnans test station. China Lake. Pasadena. Presents a technical film report on project Notty. April, 1961.
24. А. Г. Томили. Некоторые современные проблемы изучения биологии китообразных. Тр. совещаний ихтиологической комиссии АН СССР, 1961, 12, 40—49.
25. А. Г. Томили. Бионика и китообразные. Природа, 1962, 10, 101—103.
26. А. Г. Томили. Секреты поведения дельфинов и китов. Природа, 1963, 7, 70—77.
27. Джон Лилли. Как я научился говорить с моими дельфинами. Наука и жизнь, 1962, 12, 82—86.
28. Е. В. Шишкова. Физические основы рыболокации. М., Пищепромиздат, 1963.

Акустический институт АН СССР
Москва

Поступила в редакцию
21 июня 1964 г.