

Д. ГРИФФИН

# ЭХО

В ЖИЗНИ ЛЮДЕЙ

И ЖИВОТНЫХ



Д. ГРИФФИН

# ЭХО

## В ЖИЗНИ ЛЮДЕЙ И ЖИВОТНЫХ

Перевод с английского  
К. Э. ВИЛЛЕР  
под редакцией  
М. А. ИСАКОВИЧА



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО  
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

МОСКВА 1961

# ECHOES OF BATS AND MEN

DONALD R. GRIFFIN

SCIENCE STUDY SERIES

Published by Anchor Books  
Doubleday & Company, Inc.  
Garden City, New York, 1959

*Дональд Р. Гриффин.*

ЭХО В ЖИЗНИ ЛЮДЕЙ И ЖИВОТНЫХ.

Редактор *В. А. Григорова.*

Техн. редактор *Л. Ю. Плакше.*

Корректор *Е. А. Белицкая.*

Сдано в набор 25/I 1961 г. Подписано к печати 4/IV 1961 г.  
Бумага 84×108<sup>1</sup>/<sub>32</sub>. Физ. печ. л. 3,375. Условн. печ. л. 5,54.  
Уч.-изд. л. 5,97. Тираж 50 000 экз. Т-03134. Цена книги 18 коп.  
Заказ № 1432.

Государственное издательство физико-математической литературы.  
Москва, В-71, Ленинский проспект, 15.

Первая Образцовая типография имени А. А. Жданова  
Московского городского совнархоза.  
Москва, Ж-54, Валовая, 28.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

От редактора перевода . . . . .	4
Предисловие . . . . .	5
Г л а в а 1. Что говорит опыт . . . . .	7
Эксперты по эхолокации в океане. Эксперты по эхолокации в воздухе.	
Г л а в а 2. Эхо — вестник . . . . .	21
Природа звуковых волн. Эхо, которое мы редко замечаем. Волны на поверхности воды и их отражения.	
Г л а в а 3. Эхо слышимых звуков в воздухе . . . . .	39
Акустика щелчков и их эхо. Измерение скорости звука при помощи эхо.	
Г л а в а 4. Язык эхо . . . . .	58
Сигналы ориентировки у летучих мышей. Эхо от преследуемых насекомых. Точность эхолокации. Хлеб насущный на водах. Борьба с глушением сигналов.	
Г л а в а 5. Сонар и радар . . . . .	77
Эхо под водой. Применение эхо для геологических изысканий. «Эхо-анализ» и рентгеновский анализ. Радар. Сравнение эффективности эхолокации летучих мышей и радара.	
Г л а в а 6. Если бы вы были слепым . . . . .	95
Чувство препятствия. Эхо помогает ориентировке.	

---

## ОТ РЕДАКТОРА ПЕРЕВОДА

Дональд Гриффин, автор этой небольшой книги, — профессор зоологии Гарвардского университета (США). Он биофизик; основное направление его работы — применение точных методов физики к изучению сложных физиологических механизмов, лежащих в основе поведения живых существ.

Гриффин занимался, в частности, до сих пор не решенным вопросом: каким образом перелетные птицы находят дорогу домой после тысячекилометрового пути. Характерно, что он выучился управлять самолетом и совершал многочасовые полеты, чтобы поточнее проследить пути полета птиц (чаек, буревестников, глупышей), обладающих, как почтовые голуби, способностью возвращаться к своему гнезду, даже если их увезти от него на большое расстояние.

Изучение поведения животных служит Гриффину для разъяснения работы органов чувств. Эта книга посвящена изучению специальной способности слуха животных и человека: различению слабых эхо — отражений звука от окружающих предметов. Оказывается, такое различение эхо («звуковая локация») — основной способ ориентировки и восприятия окружающего мира у летучих мышей, у дельфинов и некоторых других живых существ. Помимо общенаучного интереса, изучение работы органов чувств имеет огромное прикладное значение; ясно, например, как много значило бы для улучшения ориентировки слепых хотя бы небольшое увеличение их способности распознавать эхо от окружающих предметов.

Гриффин — не только крупный исследователь в своей области, он еще и увлеченный натуралист и прекрасный популяризатор. Это счастливое сочетание и делает чтение его книги таким захватывающим.

---

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Все, что мы знаем о вселенной, убеждает нас, что она подчиняется физическим законам во всех своих частях,— как в явлениях астрономического масштаба, так и в микроскопических процессах. Поэтому новые научные горизонты могут открываться нам не только в огромном и отдаленном, но и в малом и обыденном. Так, неповторимые свойства молекул воды интересуют и захватывают нас не менее, чем история развития звездных галактик. Где-то в промежутке между этими пределами располагается легко доступное нашему наблюдению великолепное разнообразие остроумных механизмов, составляющих в своей совокупности живые тела животных и растений.

О человечестве было сказано, что оно «стоит между атомами и звездами». А между молекулами и человеком лежит область многих изумительных явлений, основанных на физических законах в самом общем смысле слова. Среди таких явлений важное место занимает использование живыми организмами волнового движения разных видов. Особенно интересно взаимодействие между звуковыми волнами и человеком или животными, которые их применяют.

Звуковые волны могут рассказать нам многое об окружающем мире, и человек и животные часто пользуются этим. Звуку присущи все свойства волнового движения; эти свойства всегда можно наблюдать, когда звук пробегает от одного места к другому, перенося сведения о предметах, с которыми он соприкасался. Все это ясно для нас в случаях, когда один человек говорит с другим или когда птицы перекликаются между собой с верхушек деревьев. Но человек и животное могут и в одиночку использовать эту способность звуковых волн переносить сведения; для этого достаточно создавать звуки и прислушиваться к возвращающимся эхо.

Особенно интересно оказалось изучать различные способы применения эхо животными и сравнивать их с искусственными устройствами, работающими на основе тех же принципов. Такое сравнение помогает понять важность сотрудничества между различными областями науки и техники для решения трудных научных вопросов. Так, одну из вековых тайн зоологии удалось раскрыть, проведя всего один вечер в специально оборудованной физической лаборатории. С другой стороны, физики, стоящие перед самыми обескураживающими практическими задачами, поразмыслив над поразительными возможностями самого маленького живого мозга, начинают верить в разрешимость этих задач.

Есть, наконец, надежда, пока еще далекая от осуществления, что мы, научившись полно и правильно использовать физические и биологические свойства эхо, сможем облегчить участь слепых людей. Ведь слепым при ориентировке в их мире вечного мрака лишь в малой степени удается делать то, что некоторые виды животных выполняют с поистине изумительным мастерством и эффективностью. Но ведь и электронные устройства, обнаруживающие дальние и невидимые цели, тоже выполняют, казалось бы, невозможное. Отметим здесь важное единство роли, которую играет эхо в биологии, психологии и физике ориентировки.

Эта книга появилась в результате плодотворного сотрудничества ученых различных специальностей и во многом основана на уже опубликованных работах этих ученых. Часть вопросов была изложена мною подробнее в книге «Слушая в темноте»<sup>1)</sup>; я благодарю издательство Йельского университета за разрешение частично использовать ее содержание. Я получил много ценных советов от сотрудников Комитета по изучению физических наук. Многие друзья и коллеги участвовали в моих собственных опытах и наблюдениях; их помощь и ободрение сыграли большую роль при проведении опытов, описанных в главах 1 и 4. Наконец, я счастлив отметить терпение и понимание моей жены и детей, отказавшихся от многих своих дел, которыми они охотно занялись бы вместо того, чтобы слушать тарактенье моей пишущей машинки.

---

<sup>1)</sup> «Listening in the Dark», New Haven, Connecticut, Yale University Press, 1958

---

## ГЛАВА I

### ЧТО ГОВОРIT ОПЫТ

В темноте почти всегда трудно заниматься каким-нибудь делом; чем полнее темнота, тем труднее справиться с работой, хотя бы и несложной самой по себе. Хуже всего приходится слепому. Создание устройств, следящих за движением дальних невидимых объектов — самолетов, летящих выше облаков, или подводных лодок, плывущих на глубине в сотни футов от поверхности океана, — также представляет собой задачу огромной трудности. Безопасное передвижение темной ночью, процесс приспособления человека, потерявшего зрение, к своей слепоте, создание приборов, обнаруживающих невидимые цели, — все это требует решения сходных задач. Все эти решения основаны на том, что в пространство посылают энергию того или иного вида, а затем принимают некоторую часть этой энергии, отразившуюся подобно эхо от дальнего объекта.

Когда мы собираемся изучать такой трудный вопрос, как использование волн для поисков чего-то невидимого, то естественно предварительно обратиться за разъяснением предстоящих трудностей к экспертам по этой части. И действительно, удастся найти экспертов, владеющих обширным практическим опытом использования эхо. Некоторые из них добывают средства к жизни тем, что при помощи эхо обнаруживают мелкие движущиеся объекты, недоступные их зрению. Речь идет здесь не о физиках и инженерах, разрабатывающих и эксплуатирующих радиолокационные и звуколокационные системы. Эти системы (о них речь будет впереди) представляют собой сложные устройства, которые посылают сигналы в виде радиоволн или звуковых волн и затем принимают отражения этих сигналов от объектов, подлежащих обнаружению. Настоящая глава посвящается



совсем другой группе экспертов: экспертов, опирающихся на длительный реальный практический опыт и пользующихся эхо не только для ориентировки, но и для добывания себе хлеба насущного. Если бы их локационные системы перестали работать, они погибли бы от голода, и под этим давлением необходимости их методы эхолокации развились до высокой степени совершенства и надежности.

Эти эксперты — животные, обитающие в местах, где звук заменил свет как наилучшее средство ориентировки, — в пещерах или темных водоемах, в которых свет практически отсутствует или настолько рассеивается, что ясная видимость невозможна ни на каком расстоянии. Из этих животных-экспертов наиболее известны киты и дельфины, которые зачастую обитают в темных или мутных водоемах и ловят невидимую для них рыбу, а также летучие мыши, свободно летающие в полной темноте и добывающие всю свою пищу перехватыванием на лету насекомых, которых они не видят. Этим животным, как и их отдаленным предкам, удалось выжить только благодаря огромному мастерству в эхолокации объектов, т. е. в определении места объектов по отраженным от них эхо. Изучая звуки, издаваемые этими животными, и то, как они варьируют звуки применительно к решению той или иной задачи при помощи эхолокации, мы сможем, вероятно, узнать много ценного для помощи слепым людям. Но даже и независимо от такой мотивировки, мы увидим, что применение эхо животными — весьма увлекательная тема сама по себе.

### Эксперты по эхолокации в океане

Только в самой прозрачной воде свет проходит по прямой такое расстояние, что можно различать объекты, удаленные более чем на несколько футов <sup>1)</sup>. Дневной свет на много не доходит до дна океана, хотя в океанских глубинах, вопреки распространенному мнению, нет полного мрака. Недавно океанографы установили, что в воде имеется множество светящихся животных; достаточно чувствительный люксметр, погруженный на глубины, куда солнечный свет уже не проникает, может зарегистрировать вспышки света, испускаемые этими животными. Однако во многих реках

---

<sup>1)</sup> Автор большей частью употребляет английские меры длины. Напоминаем, что 1 фут = 12 дюймам, — приблизительно 30,5 см. (Ред.)

и озерах муть, взвешенная в воде, ограничивает ясную видимость несколькими сантиметрами даже в дневное время. И все же великое множество рыб и других водяных существ живет активной жизнью в водах, в которых почти совсем нет видимости. Поэтому неудивительно, что некоторые из них стали применять звук в качестве средства связи и ориентировки, так как звук распространяется в воде на более далекие расстояния, чем свет.

Обычно мы представляем себе воды морей, глубоких рек и озер совершенно безмолвными (по крайней мере там, куда не проникли еще моторные лодки!), и многие даже не предполагают, что рыбы и китообразные обладают слухом. Дело в том, что наш собственный слуховой механизм рассчитан главным образом на пользование им в воздухе, а в воде работает плохо. В воздухе наши уши способны воспринимать столь слабые звуки, что они уже приближаются к уровню шумов, создаваемых беспорядочным движением молекул воздуха. Барабанная перепонка и цепь слуховых косточек и упругой ткани, передающие звуковые волны нашему внутреннему уху, великолепно приспособлены для приема звуковых волн, приходящих из воздуха, но для приема их из воды они мало пригодны. Когда мы все же слышим звуки под водой, то значительная часть акустической энергии непосредственно переходит из воды через ткани тела (в значительной мере также состоящего из воды) к чувствительным участкам внутреннего уха, где малые колебания возбуждают слуховой нерв.

Звуковые волны с трудом переходят из воздуха в воду и из воды в воздух. Граница раздела между газом и жидкостью ставит почти непроницаемый барьер для звука, и свыше 99% звуковой энергии отражается от этой границы. Иначе говоря, звуковые волны, идущие из воздуха, почти полностью отражаются от поверхности воды вверх, а подводный звук так же хорошо отражается от этой поверхности вниз. Даже нырнув в воду, мы не слышим так хорошо, как рыбы. Вот почему мы так редко замечаем звуки, издаваемые некоторыми рыбами и китообразными, хотя рыбаки и китоловы в течение веков знали об этих звуках. Даже биологи не сразу осознали, что рыбы обладают способностью слышать подводные звуки. А между тем внутреннее ухо рыбы в основном похоже на наше. Хотя звуковые волны достигают органов слуха у рыб другими путями (не через заполненные воздухом каналы, как у нас, а через самое тело рыбы), они

возбуждают слуховые нервы примерно так же, как и у человека. При частотах ниже 1000 *гц* <sup>1)</sup> звуковая энергия, которую еще может услышать полосатая зубатка, даже меньше, чем минимальная энергия, обнаруживаемая человеческим ухом. Эта область частот включает диапазоны многих музыкальных инструментов и основную высоту человеческого голоса. Правда, к звукам более высоких частот рыбы менее чувствительны, чем мы, но их слух ни в каком существенном отношении не хуже, чем у наземных животных.

Однако возможность воспринимать подводный звук мало связана с вопросом, как обучить слепых людей пользоваться эхо для получения сведений об окружающих предметах. Имеются лишь косвенные указания на то, что некоторые виды рыб, возможно, пользуются эхо. Более близкие нам морские млекопитающие — киты и дельфины — имеют мозг почти так же высоко развитый, как и наш. Их мозговые полушария соперничают с нашими и по размерам и по сложности структуры. У дельфинов, по размерам не превосходящих человека, чрезвычайно хорошо развито внутреннее ухо, а также слуховые области в мозгу. Их нельзя также назвать безгласными существами. Как только появилась аппаратура, преобразующая подводные звуки в звуки, слышимые в воздухе, обнаружилось, что дельфины положительно болтливы! «Словарь» этого животного велик и состоит из визга, свиста, хрюканья, скрежета и щелканья. Рыбакам и китоловам время от времени случалось слышать некоторые из этих звуков, однако только во время последней войны усовершенствование и широкое применение аппаратуры для подводного подслушивания позволило выявить все огромное разнообразие звуков, издаваемых морскими млекопитающими. Возможно, что многие из этих звуков служат дельфинам для сигнализации друг другу, но некоторые звуки явно используются ими для эхолокации.

В последнее время проводились опыты над дельфинами, помещенными в одиночку в небольших прудах или опытных бассейнах, например в больших морских аквариумах Флориды и Калифорнии. Оказалось, что дельфины способны обходить на большой скорости установленные в бассейне препятствия, даже если их устанавливали в самые темные ночи. Обходя препятствия, дельфины издают разного

---

<sup>1)</sup> 1 герц — это 1 период в секунду.

рода звуки, главным образом в виде слабых щелчков. Вначале эти звуки оставались незамеченными, так как они маскировались случайными шумами в пруду. Обычно дельфины обитают в открытом океане, но некоторые более мелкие виды их встречаются в мутных реках, например в Амазонке (Южная Америка) и в Ганге (Индия). Этим дельфинам зачастую приходится пробираться между подводными препятствиями, например между упавшими в воду бревнами и деревьями. Даже виды, живущие в открытых водах, не прерывают свою деятельность ночью. Все виды дельфинов питаются рыбой, которую они добывают, гоняясь за ней большей частью при плохом освещении, при видимости, не превышающей нескольких сантиметров. Поэтому неудивительно, что наиболее поразительные достижения в подводной эхолокации были проявлены голодными дельфинами при поимке рыбы.

В неволе дельфинов обычно кормят мертвой рыбой, которую им бросают в бассейн. Они скоро научаются плыть прямо по направлению к всплеску, в каком бы месте они в этот момент ни находились. Можно было бы подумать, что голодный дельфин просто локализует громкий всплеск воды, который он научился связывать с пищей. Однако двое внимательных экспериментаторов, Вильям Шевилл и его жена Барбара Лоренс-Шевилл, работавшие в 1955 г. в Вудсхольском Океанографическом институте, заметили, что дельфины находили эхолокационным способом небольшие куски пищи, помещаемые в бассейн без всякого шума. Животное проводило много времени в поисках пищи по всему пруду и при этом издавало слабые звуки, похожие на поскрипывание, которые удалось уловить лишь при помощи чувствительной аппаратуры для подводного подслушивания. Этих звуков не мог услышать ни человек, стоявший на берегу пруда, ни пловец, голова которого находилась под водой. Звук состоял из последовательности щелчков, повторяемых с различной частотой, иногда так быстро, что был слышен только режущий ухо скрежет или жужжание. Шевилл и Лоренс предположили, что дельфин прислушивается к эхо, отражающемуся от рыбы. Они попытались выяснить, может ли дельфин при помощи эхолокации обнаружить и распознать небольшую мертвую рыбу, и если может, то приблизительно на каком расстоянии. Для того чтобы исключить видимость, они часто работали темными ночами.

Но и без того вода в маленьком пруду, диаметром всего около 20 м, взбаламученная непрерывным плаванием дельфина, превращалась в совершенно мутную жижу. Погруженная в воду на глубину около 60 см ярко окрашенная металлическая пластинка становилась невидимой даже при солнечном свете.

Когда кто-нибудь, сидя в лодке, привязанной к берегу, держал неподвижно мертвую рыбку на глубине в несколько сантиметров под водой, дельфин научался приплывать к

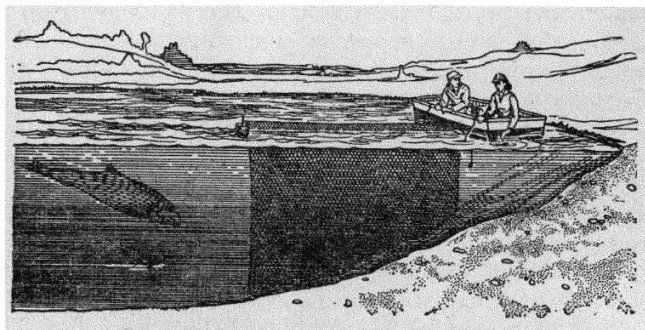


Рис. 1. Расположение сети и лодки в опытах Шевилла и Лоренс при изучении эхолокации у дельфинов.

ней, издавая все время свое «поскрипывание», и схватывать добычу. Чтобы точнее определить расстояние, на котором дельфин еще обнаруживал рыбу, от лодки перпендикулярно к берегу была протянута рыбацья сеть, как это изображено на рис. 1. Сеть выдавалась в воду на 2,4 м, и уже на несколько большем расстоянии дельфин должен был решить, по какую сторону сети ему плыть к лодке, чтобы найти ожидаемую пищу. Приманку опускали в воду то с одного конца лодки, то с другого, попеременно, но без правильного порядка чередования; однако если приманки под водой 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 своего «поскрипывания», то он не приближался, даже когда рыба была погружена в воду.

В своих наиболее показательных опытах Шевилл и Лоренс сидели на противоположных концах лодки, стоявшей на якоре, и каждый из них держал в вытянутой руке рыбу,

В то время как некормленный дельфин плавал мимо них в темной мутной воде. Время от времени то один, то другой экспериментатор осторожно и бесшумно опускал в воду 15-сантиметровую рыбку, едва погружая ее. Если голодный дельфин, проплывая мимо, издавал свое «поскрипывание», то обычно он приплывал, чтобы схватить добычу. В трех случаях из четырех дельфин правильно выбирал сторону сети, хотя он привык примерно одинаково часто получать пищу с обоих концов лодки.

Этот эксперимент и другие опыты показали, что дельфин умеет не только обнаруживать отдельные эхо своих звуков от таких малых объектов, как 15-сантиметровая рыбка, но, что еще удивительнее, — отличать эти эхо от всех других, отраженных от дна пруда, поверхности воды, от берега, сети, дна лодки, — не говоря уже о камнях и водной растительности.

Если дельфин при помощи эхолокации может обнаружить 15-сантиметровую рыбу, то разве не сможет слепой человек воспринять эхо от лежащих на полу или на столе предметов таких же размеров? Целый ряд факторов даже ставит дельфинов в менее благоприятное положение. В воде скорость звука в четыре с половиной раза больше, чем в воздухе, так что в воде разности времен прихода эхо от объектов, расположенных на различных расстояниях, гораздо меньше, чем в воздухе, и поэтому эти объекты должно быть соответственно труднее отличать друг от друга. Далее, для звуковых волн тело рыбы представляет собой среду, очень похожую на воду, и большая часть энергии подводного звука, падая на водоподобное тело рыбы, проходит сквозь него так, как если бы рыбы вовсе не было. С той же физической задачей мы сталкиваемся и в случае тела и слухового аппарата дельфина, который также почти «прозрачен» для подводного звука; взаимодействие звуковых волн с различными частями тела дельфина мало. В опытах Шевилла и Лоренс дельфин, вероятно, воспринимал эхо не от тела 15-сантиметровой рыбки, а от ее маленького плавательного пузыря, наполненного воздухом и отражающего звук примерно так же, как и пузырек воздуха. Однако подробное рассмотрение всех физических свойств подводного звука, имеющих важное значение для эхолокации, столь искусно применяемой дельфинами, завело бы нас слишком далеко.

Можно было бы попытаться объяснить точность, с которой дельфин обнаруживает эхо от рыб, следующими двумя

факторами: широким диапазоном частот издаваемых им звуков и диапазоном частот его слухового восприятия. Действительно, опыты показали, что дельфин слышит звуки, частоты которых простираются от 150 *гц* до 150 000 *гц*. Возможно, что в действительности пределы слышимости еще шире, но аппаратура не позволяла производить измерения за этими границами. Длина волны звука с частотой 150 000 *гц* в воде, где скорость звука в 4,5 раза больше, чем в воздухе, короче длины волны самого высокого тона, нормально воспринимаемого человеком. Вряд ли кто-либо, кроме маленьких детей, может настолько хорошо слышать частоты, превышающие 15 000 *гц*, чтобы по их эхо судить о присутствии тех или иных предметов. Однако преимущество этого десятикратного повышения порога воспринимаемых частот в значительной степени обесценивается увеличением длины волны звука в воде. В итоге следует ожидать, что, даже учитывая меньшие длины звуковых волн в эхолокационном наборе дельфина, его преимущество перед слепым человеком не превышает примерно двукратного. Отсюда следует, что своим превосходящим мастерством в искусстве эхолокации, которую (как увидим в главе 6) пытаются применять и слепые, дельфин обязан не длине волны, а каким-то другим факторам. Возможно, что дельфины научились обращать больше внимания на эхо, а возможно также, что за свою длительную эволюционную историю они развили слуховой аппарат и мозг в сторону лучшего приспособления (хотя мы и не знаем, в каком именно отношении) для выделения нужных им эхо из сложной смеси звуков, которые бомбардируют их уши.

### Эксперты по эхолокации в воздухе

Дельфины — крупные, эффектные экзотические животные, и мы сравнительно легко допускаем, что в своем подводном мире они способны творить чудеса. В больших открытых аквариумах их дрессируют, приучая выполнять цирковые трюки; например, они выскакивают из воды через горящий обруч, ловят резиновые мячи или рыбу, которую им швыряют дрессировщики, и даже бросают обратно какой-либо предмет зрителю. Никто из видевших когда-либо такие представления (или хотя бы кинофильмы о них) не может сомневаться в смысленности и ловкости дельфинов. Но они живут в воде, а не в нашей среде — воздухе.

Поэтому изучение их поведения кажется нам более далеким от проблем, стоящих перед слепым человеком, чем изучение другой большой группы животных, широко использующей эхо в своей повседневной жизни. Речь идет о летучих мышах — крошечных, загадочных и, будем говорить прямо, для многих из нас — отталкивающих существах. Маленькие млекопитающие, покрытые мехом, похожие на обыкновенных мышей, но снабженные крыльями, они предпочитают темноту и чувствуют себя как дома в самых мрачных пещерах. Людям приходится с ними иметь дело главным образом как с захватчиками чердаков и летних помещений. На первый взгляд трудно себе представить, что изучение летучих мышей может внести какой-нибудь ценный вклад в биофизику ориентировки слепых людей.

Наводящая страх необычность летучих мышей и поверья, связывающие их с нечистой силой и преисподней, внушают нам отвращение к ним. Но летучие мыши — большие эксперты по применению эхо, и если мы хотим выяснить, что можно узнать об окружающих нас предметах по отражаемым ими эхо, мы должны быть готовы выслушать важные показания, независимо от своих чувств по поводу источника сведений. Мы допустили бы большую оплошность, если бы не обратили внимания на искусство летучих мышей в использовании эхо для управления своим быстрым полетом.

Наши первые сведения о навигации летучих мышей относятся к 1793 г., когда блестящий итальянский ученый Лаццаро Спалланцани заинтересовался способами, какими различные животные находят дорогу в темноте. Он нашел, что совы и другие ночные существа полагаются на свои большие глаза, но в полной темноте и они становятся беспомощными. Но когда он начал экспериментировать с летучими мышами, то был поставлен в тупик, обнаружив, что они продолжали летать почти так же хорошо и тогда, когда ничего не могли видеть. Не удовлетворившись опытами, в которых летучие мыши продолжали спокойно порхать в самых темных помещениях, какие ему только удалось найти, он, наконец, лишил зрения нескольких летучих мышей. Но и тогда они продолжали летать так же хорошо, как всегда. Спалланцани выпустил на волю нескольких летучих мышей, лишенных зрения, и через четыре дня отправился на колокольню собора в Павии, где он их ранее поймал для опытов. Желая выяснить, сохранили ли летучие мыши способность продолжать свою обычную деятельность



после того, как лишились зрения, он взобрался на верхушку колокольни рано утром, сразу после обычного времени возвращения летучих мышей со своих ночных полетов и поисков пищи. Подобно всем летучим мышам умеренного климата, они питались исключительно насекомыми, которых преследовали и ловили на лету. Спалланцани поймал четыре экземпляра из летучих мышей, лишенных им зрения, и обнаружил при вскрытии, что их желудки были так же туго набиты остатками насекомых, как и у зрячих экземпляров.

Спалланцани провел еще ряд других опытов; познакомившись, кроме того, с опытами, которые провел швейцарский биолог Шарль Жюрин, он пришел незадолго до своей смерти в 1799 г. к выводу, что летучие мыши могли бы обойтись и без зрения, но всякое серьезное повреждение слуха для них губительно. Стоило заткнуть им уши, как они начинали слепо и беспорядочно наткаться на все препятствия на их пути. Хотя для того, чтобы получить у летучих мышей полную потерю ориентировки, нужно было очень плотно затыкать им уши, опыты Спалланцани оказались вполне убедительными. Примером его изобретательности в опытах может послужить способ, примененный им для доказательства, что именно нарушение слуха летучих мышей, а не механическое раздражение или повреждение, вызванное затыканием ушей, расстраивало их навигаторские способности. Он изготовил миниатюрные медные трубочки и точно подогнал их к ушным отверстиям летучих мышей. В девяностых годах XVIII века это было нелегкой задачей, если учесть, что диаметр ушных каналов летучих мышей меньше одного миллиметра. При вставленных, но открытых трубочках летучие мыши продолжали летать почти с обычным искусством. Но стоило плотно заткнуть трубочки, что не увеличивало вызываемого ими механического раздражения, как летучие мыши совершенно теряли ориентировку и беспорядочно наталкивались на все препятствия. Спалланцани испробовал несколько способов затыкания ушных отверстий. Во всех случаях, когда затыкание было плотным, летучие мыши становились беспомощными.

В то же время на целом ряде разнообразных опытов было показано, что нарушение деятельности других органов чувств — зрения, осязания, обоняния и вкуса — никакого влияния на полет летучих мышей не оказывает. Однако эти открытия оставались непонятными, поскольку по всем

данным представлялось, что летучие мыши не издавали никаких звуков ни до, ни после всех этих опытов. Как слух мог заменить им зрение в управлении полетом? В 1800 г. казалось, что на этот вопрос ответа нет, и открытия Спалланцани были отвергнуты, высмеяны, а затем почти совсем забыты. Досужие критики высказывали предположение, что летучие мыши обладают неким тонким чувством осязания, органы которого, возможно, расположены в перепонках их крыльев и благодаря которому они и обнаруживают препятствия на расстоянии и избегают столкновений с ними. Однако никто даже не пытался объяснить, каким образом летучим мышам, лишенным зрения, удавалось наполнять свои желудки летающими насекомыми.

Так называемая «спалланцаниева проблема летучих мышей», как ее стали называть впоследствии, была разрешена лишь около двадцати лет назад. Это стало возможным благодаря появлению новой электронной аппаратуры, разработанной в Гарвардском университете физиком Г. В. Пирсом для обнаружения звуков, лежащих по частоте за порогом слышимости человека. Как только я поднес летучих мышей к аппарату Пирса, сразу же обнаружилось, что они издают множество звуков, но почти все эти звуки попадают в диапазон частот, лежащий выше порога слышимости человека. В последующих опытах, проведенных совместно с Робертом Галамбос, в настоящее время работающим в военном исследовательском институте Уолтера Рида, было показано, что закрывание рта летучей мыши, лишаящее ее возможности издавать эти высокочастотные звуки, оказывается столь же эффективным, как и плотное затыкание ее ушей. И в том и в другом случае мыши совершенно теряют способность обнаруживать как большие, так и малые предметы и натываются на стены комнаты и на любые препятствия на их пути. Короче говоря, во время своих полетов летучие мыши ориентируются исключительно по отражениям высокочастотных звуков, почти непрерывно издаваемых ими в полете. Длины волн этих звуков короче и частоты соответственно выше, чем у звуков, доступных для наших ушей; поэтому-то способность летучих мышей летать в полной темноте и представлялась столь таинственной. Однако, как только этот простой факт стал известен, все стало ясным, во всяком случае в общих чертах.

В действительности не все звуки, используемые летучими мышами для навигации, совершенно не слышны. Хотя для

летучих мышей лучше всего изученных видов более 99,9% испускаемой звуковой энергии относится к частотам, лежащим вне пределов человеческого слуха, имеется еще и очень слабая слышимая компонента. Она настолько слаба, что ее легко принять за шорох крыльев, и Спалланцани действительно не заметил ее. Каждый раз, когда летучая мышь издает короткий звуковой сигнал очень высокой частоты, который может быть обнаружен только при помощи соответственной электронной аппаратуры, можно услышать также слабый звук, похожий на тиканье. Может быть, кому-нибудь из читателей случится теплым вечером наблюдать летучих мышей и слышать издаваемые ими звуки. Летучие мыши умеренного климата часто гнездятся в расщелинах зданий и вылетают каждый вечер между заходом солнца и наступлением полной темноты. Если вы станете близко от трассы их полета (на расстоянии 1—2 м), если кругом действительно тихо и вы не вскрикнете от испуга, то вы сможете услышать это тиканье.

Чем вы моложе, тем легче вам будет услышать это тиканье, так как даже слышимая компонента имеет высокую частоту, порядка 5000—10 000 *гц*. Существует также несколько видов питающихся плодами тропических летучих мышей, которые при полетах в темных пещерах издают отчетливо слышимое тиканье. При свете они пользуются глазами, которые у них гораздо больше, чем у насекомоядных летучих мышей. Два вида пещерных птиц также издают громкие щелчки при полетах в полной темноте, но при свете они пользуются зрением.

Длительность слабой слышимой компоненты звука, используемого летучей мышью для ориентировки, весьма мала; этот звук напоминает тиканье дамских часов. Однако, в отличие от часов, темп тиканья, издаваемого летучей мышью, может заметно изменяться. Когда летучая мышь летит прямо на удаленные от нее препятствия, то она издает от пяти до двадцати тиканий в секунду. В тех же случаях, когда перед ней возникают более сложные навигационные задачи, например, когда ей нужно избежать столкновения с вами или с палкой, поднятой вами перед собой, можно услышать, что тиканье внезапно учащается, пока не перейдет в слабое жужжание. То же самое происходит перед посадкой летучей мыши, но звуки тиканья при этом настолько слабы, что услышать их можно только в полной тишине и проявив значительное терпение.

Акустический принцип обнаружения препятствий летучими мышами был независимо установлен в 1932 г. голландским зоологом Свенем Дикграафом, который тщательно изучил слабые слышимые щелчки, издаваемые летучими мышами, и установил их тесную связь с эхолокацией препятствий. Это—пример того, какое внимание и терпение, вместе с благоприятными условиями наблюдения, требуются для обнаружения и изучения некоторых из самых увлекательных явлений природы.

Однако летучие мыши не всегда так быстры и ловки в полете. Иногда они сонливы и неповоротливы, особенно если их потревожить в дневное время. У большинства американских и европейских видов летучих мышей температура тела во время сна падает до температуры окружающего воздуха. Зимой многие виды летучих мышей впадают в спячку в пещерах или других местах, где температура всего на несколько градусов выше точки замерзания. При таких температурах летучие мыши совершенно цепенеют и их легко принять за мертвых. Между глубокой спячкой и состоянием полной активности летучая мышь проявляет различные степени подвижности и проворства. Те летучие мыши, которых нам легче всего найти и наблюдать,— это обычно наименее активные животные, не проявляющие готовности продемонстрировать нам весь свой репертуар летных маневров. А когда они полностью владеют своим летным мастерством, то вряд ли позволят долго наблюдать себя на близком расстоянии. Кроме того, летучие мыши быстро устают, и если гоняться за ними по комнате или чердаку, то от утомления они становятся неповоротливыми. Стоит, однако, постараться понаблюдать за ними, когда они «в форме», полностью бодрствуют и в совершенстве владеют своим искусством, что обычно бывает в летние вечера, при охоте за насекомыми; тогда их подвижность и точность полета по сложным трассам поистине поразительны. Летучей мыши, в самую темную ночь свободно пролетающей между мелкими ветвями ели, ничего не стоит проскользнуть между перекладинами стула.

Познакомившись с двумя группами экспертов-практиков по эхолокации, постараемся, прежде чем идти дальше, представить себе точку зрения, с которой Спалланцани мог подходить к этим явлениям. Интерес к зрению ночных животных побудил его выполнить длинный ряд тщательно подготовленных и доказательных опытов над летучими

мышами. Несмотря на то, что он не слышал никаких звуков во время их полетов, он все же в конце концов убедился (хотя вначале сам был настроен весьма скептически) в том, что органом чувств, сообщавшим летучим мышам о наличии таких малых объектов, как нити, натянутые поперек комнаты, где их заставляли летать, были уши, а не глаза. Объяснить этот вывод он смог не в большей мере, чем его критики. Но он настолько доверял экспериментально доказанным фактам, что был убежден в правильности своих открытий, хотя и не мог уложить их в удовлетворительную логическую систему. Такая ситуация может время от времени возникать в любой области науки и часто означает, что мы находимся на пороге открытия нового важного закона. Если факты не укладываются в наши теории, это обычно свидетельствует о необходимости изменить теорию.

Есть ли какие-либо основания считать, что история развития науки закончилась как раз в наше время? Почти наверное нет; а это значит, что и в будущем неизбежны новые совершенно неожиданные открытия. Пример Спалланцани и акустическая ориентировка летучих мышей могут напомнить нам целый ряд важных моментов. Во-первых, мы можем натолкнуться на самые плодотворные открытия в самых неожиданных, на первый взгляд, областях. Во-вторых, общепринятые теории тех или иных явлений в прошлом часто оказывались ошибочными. Всегда можно найти основания для конструктивного пересмотра даже наиболее твердо установленных теорий. Кто знает, какие общепринятые убеждения еще потребуют такого же пересмотра, как существовавший в девятнадцатом веке взгляд, что летучие мыши находят свой путь в темных пещерах при помощи некоего чувства осязания, локализованного в их крыльях?

---

## ГЛАВА 2

### ЭХО — ВЕСТНИК

Поскольку летучим мышам и дельфинам удастся узнать столь многое, слушая эхо, важно исследовать свойства звуковых волн, делающие их такими эффективными вестниками. Для того чтобы звук или другого рода волновое движение смогли сообщить нам что-либо, они должны прийти во *взаимодействие* с чем-нибудь: с поверхностью земли, стенами дома или сложным механизмом прислушивающегося уха. Обнаружить волновое движение можно лишь после того, как оно прямо или косвенно воздействовало на какое-либо материальное тело.

Попробуйте представить себе какое-нибудь излучение, проникающее сквозь все, что встречается на его пути, и распространяющееся все дальше и дальше без всяких изменений, искажений или отклонений от исходного направления. Как смогли бы мы узнать хотя бы только о самом существовании такого излучения? Космические лучи большой энергии и субатомные частицы, называемые нейтрино, в обычных условиях лишь очень слабо воздействуют на вещество; поэтому их весьма трудно было обнаружить, а мало-мальски точные измерения почти невозможны еще и теперь. Слабые радиоволны, излучаемые естественными источниками, всегда существовали и проходили сквозь тела наших предков, так же как и сквозь наши тела. Но только в последнее время люди стали наблюдать их взаимодействие со специальными приборами и таким образом узнали об их существовании.

Предположим, что вдруг все в мире стало совершенно прозрачным и что, кроме того, никакой предмет не испускает света, а направление распространения света при переходе из одной среды в другую не меняется. В таком мире мы

были бы подобны слепым. Даже если бы мы обладали тем единственным органом чувств или индикатором, который был бы способен воспринимать излучение, проникающее через все остальные тела во вселенной, то и эта особая способность принесла бы нам мало пользы. Только потому, что свет и звук взаимодействуют с окружающим нас веществом, мы можем обнаруживать их при помощи чувствительных индикаторов. Именно поэтому животные и люди развили у себя такие эффективные органы зрения и слуха.

### Природа звуковых волн

Волновое движение удобно представлять себе в простейшей непрерывной форме: как звук одной-единственной частоты, создающий, например, 2000 звуковых волн или циклов в секунду; либо как свет чистого спектрального цвета, например, линия  $D$  натриевого пламени, частота которой равна  $5,1 \cdot 10^{13}$  периодов в секунду (51 000 000 000 000 *Гц*). Для большинства целей подобные волны могут быть достаточно точно представлены в виде графика, на котором переменная величина, характеризующая волновое движение, отложена на одной оси, а время — на другой оси. Для звука одной-единственной частоты или для чистого спектрального цвета графики дают плавно изгибающиеся кривые, так называемые *синусоиды*.

Синусоидальная кривая получится, например, если построить временную зависимость вертикального смещения стрелки часов. Привяжем нить к концу часовой стрелки стальных часов обычного школьного типа, а к другому концу нити подвесим легкий грузик (рис. 2). В 9 часов, а также в 3 часа груз будет находиться на полпути между самым высоким и самым низким своим положением, и мы можем провести на стене под часами горизонтальную среднюю линию на этом уровне. Предположим, далее, что и в другие моменты времени мы измеряем, насколько груз находится выше (или ниже) этой средней линии; наибольшее расстояние до средней линии будем называть амплитудой колебания и обозначим через  $a$ . В полдень расстояние будет равно  $+a$ , а в 6 часов оно будет равно  $-a$ . Через каждые шесть часов отклонение обращается в нуль, а около полудня и около шести часов кривая замедляет свое нарастание или убывание и движение меняет свое направление. Если бы мы подвязали груз не к часовой, а к минутной стрелке часов, то за один

оборот часовой стрелки груз совершил бы 12 отклонений вверх и вниз от средней линии.

Эта же кривая изображает синусоидальную функцию, изучаемую в геометрии и тригонометрии. Однако в этом удобном представлении волны нет возможности учета ее взаимодействия с материальными телами. Поэтому для выяснения свойств звука как передатчика сведений нам придется представлять себе волну несколько по-иному или по крайней мере придется несколько дополнить упрощенное представление о

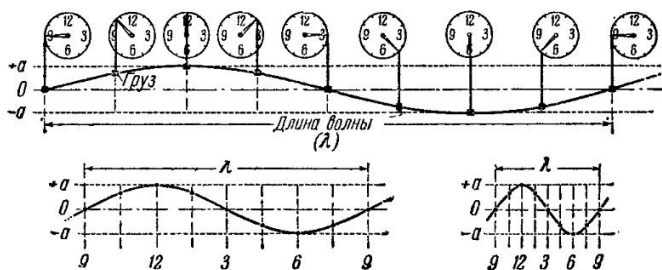


Рис. 2. Графическое изображение колебаний маятника или груза на стрелке часов представляет собой синусоиду, дающую плавное увеличение и уменьшение отклонения с течением времени. Обе нижние кривые изображают те же отклонения, что и верхняя кривая, но в измененных масштабах времени.

непрерывной синусоидальной волне. Это увеличит интерес всего вопроса о волновом движении сравнительно с тем, что приходится узнавать в школьном курсе физики.

Что же такое звуковые волны и в чем их отличие от других видов волнового движения? Когда звук распространяется в какой-нибудь среде, например в воздухе, давление в среде ритмически изменяется, то возрастая, то убывая в каждой данной точке в темпе, который мы называем частотой звука (рис. 3). Эти изменения давления могут, конечно, и не быть регулярными. Однако даже в тех случаях, когда они настолько нерегулярны, что нельзя говорить об одной частоте звука, изменения давления все же остаются знакопеременными, и атмосферное давление колеблется, то превышая, то не доходя до своего среднего значения, называемого давлением в одну атмосферу и измеряемого при помощи барометра (на уровне моря атмосфера оказывает такое же давление, как и столб ртути высотой 76 см). Далее, области



слегка повышенного и слегка пониженного давления распространяются в воздухе, так что зона повышенного давления, которая в данный момент прошла через данную точку, будет в следующий момент обнаружена уже на некотором расстоянии от нее. Эти изменения давления воздуха гораздо меньше, чем обычно себе представляют. Например,

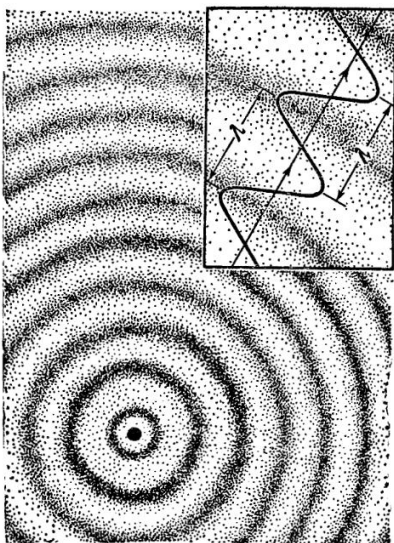


Рис. 3. Если бы можно было сфотографировать распределение молекул воздуха вблизи источника звука, то оказалось бы, что в некоторых местах молекулы группируются тесно, а в других — свободно. В местах сгущения давление повышено, в местах разрежения — понижено. График изменения давления представляет собой синусоиду.

быть в равной мере и животное, а не только человек. Но, если только не считать, что в отсутствие людей свойства водопада и окружающего воздуха совершенно меняются, несомненно, что пока вода продолжает падать вниз, физические звуковые волны не перестают непрерывно возникать.

Звуковые волны распространяются не только в газах, например в воздухе, но также и в жидкостях и в твердых те-

громкий крик вызывает изменение давления воздуха всего на 0,00001—0,0001 атмосферы, а самый слабый звук, воспринимаемый человеком с нормальным слухом, соответствует изменениям давления на  $2 \cdot 10^{-10}$  (2/10 000 000 000) атмосферы.

Бывало, люди задавали себе вопрос, существует ли звук в отсутствие слушателя. Спорили о том, шумит ли водопад в диких пустынных местах, где его некому слышать. Такие вопросы теряют свое значение, если только проводить различие между физическим явлением звуковых волн, как изменений давления, распространяющихся в воздухе, и субъективным ощущением восприятия звука. Для восприятия звука слушатель, конечно, нужен, но это может

лах. Хотя мы будем иметь дело главным образом с распространением звука в воздухе, следует помнить, что звуковые волны (т. е. перемещающиеся изменения давления) могут распространяться также через океанские глубины и через самую твердую сталь. Есть, однако, одно безусловное требование для возможности распространения звуковых волн: обязательно должна быть какая-нибудь среда, в которой они могли бы бежать, и они никак не могут существовать в пустом пространстве, в полном вакууме. В самом деле, давление вызывается соударениями молекул друг с другом и с поверхностью жидких или твердых тел, образующих границы газа. Звук может распространяться с заметной интенсивностью только в средах, где имеется заметное давление, т. е. в средах, в которых молекулы расположены достаточно близко друг к другу, чтобы часто сталкиваться между собой.

Следующая важная характеристика звуковых волн — это скорость их распространения. Возникшие звуковые волны перемещаются в данной среде и при данных условиях с постоянной скоростью. По мере распространения они делаются все слабее и слабее и в конце концов полностью замирают. Но пока они еще остаются заметными, их скорость не меняется. Не зависит скорость также и от частоты звука. Это означает, что в случае, когда звук содержит больше чем одну частоту (т. е. когда форма звуковых волн сложнее, чем простая синусоида), все составные части сложного звука движутся вместе и ни одна из компонент не отстает и не опережает остальные. Скорость звука зависит главным образом от среды, в которой распространяются звуковые волны, но имеется и слабая зависимость от температуры и некоторых других факторов. Например, скорость звука в воздухе при температуре  $20^{\circ}\text{C}$  равна  $344\text{ м/сек}$ , а в морской воде при  $0^{\circ}\text{C}$  —  $1550\text{ м/сек}$ . Эти расстояния довольно велики, но, конечно, много меньше, чем расстояние, пробегаемое за одну секунду светом или радиоволнами и равное  $300 \cdot 10^6\text{ м}$ . Так как расстояния в сотни и тысячи метров менее наглядны, чем расстояния, сравнимые с размерами тела человека, то мы часто будем характеризовать скорость звука расстоянием, пробегаемым им за одну миллисекунду, т. е. за одну тысячную секунды. Скорость  $344\text{ м/сек}$  соответствует пути в  $34,4\text{ см}$  или примерно в 1 фут, пробегаемому за одну миллисекунду; эту цифру легко запомнить, и она удобна в случае звуков весьма малой длительности.

Важное значение имеет также длина волны звука. Длина волны — это расстояние между двумя последовательными зонами максимума или минимума давления, возникающими при распространении звуковой волны. Так как скорость звука в данной среде постоянна, то на расстоянии 344 м, пробегаемом им в одну секунду, уложится либо большое число коротких волн, либо малое число длинных волн. Если волны короткие, то на заданном расстоянии их уложится большее число и за данный промежуток времени большее их число достигнет заданной точки, иначе говоря, частота их будет выше. Соотношение между скоростью звука  $v$ , его частотой  $f$  и длиной волны  $\lambda$  можно выразить следующим простым уравнением:  $v = f \cdot \lambda$ . Так как при заданных условиях скорость звука постоянна, то длина волны изменяется обратно пропорционально частоте. Длина волны звука с частотой 344 гц приблизительно равна 1 м. Частоте 1376 гц соответствует длина волны 0,25 м, а длине волны 2 см (0,02 м) соответствует частота  $344 : 0,02 = 17\,200$  гц. Высокие частоты часто выражают в килогерцах (тысячах периодов в секунду).

Звук любой частоты, длящийся одну секунду, занимает при распространении в воздухе участок длиной 344 м, считая от начала до конца группы звуковых волн. Щелчок длительностью 1/100 секунды занимает участок в 3,4 м, считая от его фронта до тыла. А фраза, на произнесение которой требуется 10 секунд, растянулась бы на расстояние 3440 м (больше двух миль) от рта, если бы голос говорящего был достаточно силен, чтобы быть слышимым на таком расстоянии. Принимая, что атмосфера достаточно плотна для того, чтобы передавать звуковые волны вверх на высоту 30 000 м, и что ваш голос обладает достаточной громкостью, любопытно прикинуть, как долго должен тянуться звук, чтобы образовать непрерывный цуг волн вверх от вашего рта до этой высоты. Это время будет равно  $30\,000 : 344$ , т. е. около 87 секунд, или приблизительно 1,5 минуты. За это время можно прочесть вслух полстраницы печатного текста.

Взаимодействие звуковых волн с нами самими и с окружающими нас предметами не так очевидно, как взаимодействие световых волн. Действительно, почти каждый твердый предмет, на который с одной стороны падает свет, отбрасывает тень. Однако, если этот же самый предмет, отбрасывающий световую тень, поместить между источником звука и нашим ухом, то мы услышим звуки обычного характера

почти без изменений. Звук легко огибает углы, и поэтому труднее преградить ему путь в дом, или в комнату, или к научной аппаратуре (рис. 4). Хотя стены и другие преграды и ослабляют громкость звуков, мы все же редко говорим о степени заграждения или о степени передачи или отражения звука. До того необычен для нас этот вопрос, что у нас нет общепринятых слов, аналогичных терминам «прозрачный»

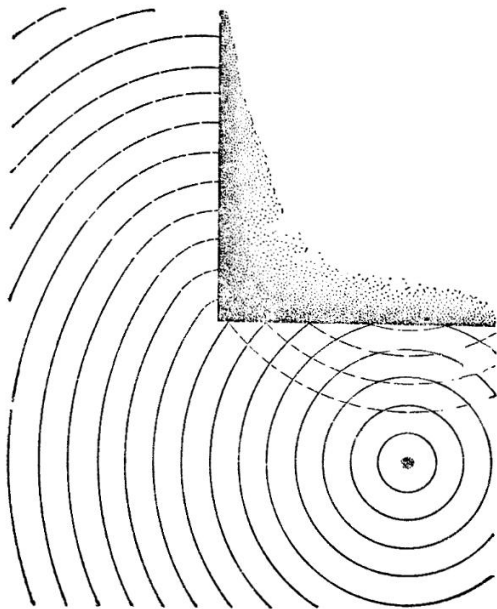


Рис. 4. Звук не образует резких теней, но огибает углы и отражается от твердых объектов.

или «непрозрачный», которые выражали бы факт легкого проникновения звуковых волн сквозь данное вещество или невозможность проникновения. Нет у нас также акустических эквивалентов понятий «блестящий» или «матовый» для описания поверхностей, отражающих звук главным образом в одном направлении или примерно одинаково во всех направлениях.

Отраженные звуковые волны получили название эхо или реверберации. Они оказывают значительное влияние на то, что именно мы слышим. Мы видели, что некоторые животные, например летучие мыши и дельфины, пользуются

эхо для ориентировки. Человек, лишенный зрения, также использует звук для своей ориентировки; какую роль при этом играют отраженные звуковые волны,— будет подробнее рассмотрено в конце книги. Прежде чем идти дальше, уместно уточнить значения некоторых слов, полезных для описания способности звуковых волн переносить информацию.

*Эхо* обычно означает четкое изолированное отражение звука от поверхности, расположенной на значительном расстоянии. *Реверберация* образуется многократными отражениями звука от близко расположенных поверхностей, когда отраженные волны перекрываются и смещиваются с исходными звуковыми волнами. В более общем смысле эхо означает звуковую волну, направление которой существенно изменилось в результате падения на некоторое тело. Когда отраженные волны распространяются в том же пространстве, что и волны, вышедшие позже из того же источника звука, то они взаимодействуют, и прежний уровень давления воздуха либо повышается, либо понижается. Если наличие эхо вызвало повышение давления в данной точке в данный момент времени, то говорят об *усиливающей интерференции* или взаимном усилении. Если звуковое давление понизилось по сравнению с тем, каким оно было бы в отсутствие отраженных волн, то говорят об *ослабляющей интерференции* или взаимном гашении волн. Эти термины имеют для звуковых волн точно тот же смысл, что и для света.

Существенно понять связь между скоростью звука, с одной стороны, и различием между реверберацией и эхо, с другой. В воздухе, обуславливающим большую часть наших слуховых восприятий, звук длительностью в 1 секунду занимает в воздухе участок 344 м, так что для слушателя, находящегося около источника звука, эхо начнется после окончания исходного звука только в том случае, если звук отразился от объекта, расположенного дальше, чем на половину этого расстояния (172 м). За одну секунду можно произнести несколько слогов, например: «сто тысяч сто», а при некотором усилии можно повторять короткий слог, например «ди», пять раз в секунду. Если произнести один короткий слог, длящийся 0,2 секунды, то его эхо можно будет услышать отдельно от исходного звука при расстоянии до отражающей поверхности, превышающем 34 м (172·0,2). Не часто случается услышать эхо, ясно отделенное по времени от исходного звука. Это объясняется

отчасти тем, что нам редко приходится иметь дело с единичными звуками такой малой длительности (0,2 секунды) или с расстояниями до отражающих поверхностей, превышающими 34 м, а частично тем, что наш слух признает два звука за отдельные только тогда, когда между ними есть некоторая доля секунды тишины. Даже когда два звука настолько близки по времени, что воспринимаются как один, их комбинация обычно звучит по-иному, чем каждый из них в отдельности. Два щелчка, следующие один за другим слишком близко, чтобы их можно было воспринять как двойной щелчок, звучат глуше, чем каждый в отдельности. Если же сблизить их по времени еще больше, то два щелчка будут звучать просто как один более громкий щелчок.

### Эхо, которое мы редко замечаем

Эхо, обычно следующие за каждым произносимым нами словом, изменяют тембр и силу звука, хотя мы и не воспринимаем отражения как отдельные звуки. Это иллюстрируется простым опытом, в котором какой-нибудь постоянный источник звука прослушивают в помещении и на открытом воздухе. «Источником звука» может служить просто разговорчивый приятель, хотя он почти наверное изменит громкость своей речи при переходе из комнаты на открытый воздух. Лучше взять портативный радиоприемник, если только каркас здания не содержит большого количества металла, которое будет экранировать радиоволны. Выберем для опыта деревянный дом и, поставив приемник снаружи на землю, установим нормальный уровень громкости речи или музыки. Если теперь перенести приемник в маленькую комнату, то он будет звучать гораздо громче. Повышение громкости вызвано увеличением полной акустической энергии за счет волн, отраженных от стен. Кроме того, изменится тембр голоса диктора, так как помещение по-разному влияет на различные частоты звука.

Конечно, этот опыт груб и может осложниться еще рядом непредвиденных обстоятельств. Наше внимание мог отвлечь случайный шум на улице, мы могли подойти ближе к громкоговорителю. Возможно, что когда приемник стоял в комнате, диктор случайно говорил громче. Для большей надежности лучше взять неизменяющийся источник звука, например свисток, пишущую машинку, будильник или другой источник шума, вроде детской погремушки или ее более

громкой разновидности — новогодней трещотки. По многим причинам лучше всего воспользоваться магнитофоном, который легко можно переносить с места на место и выносить из помещения наружу. Тогда можно будет использовать один и тот же отрывок речи или музыки или сделать запись, в которой одна и та же последовательность звуков повторяется достаточно часто, чтобы ее можно было многократно прослушивать в комнате и на открытом воздухе. Если — как это и подобает! — вы еще продолжаете сохранять скептицизм, то у вас может возникнуть вопрос, не происходят ли в вас самом какие-нибудь изменения, когда вы переходите из комнаты наружу и обратно? Не становится ли ваш слух менее чувствительным на открытом воздухе? Как показали многочисленные опыты, в обычных условиях это не так. Кроме того, пользуясь микрофоном, подключенным к чувствительному вольтметру, мы можем произвести объективные измерения интенсивности звука в обоих местах. Такие измерения подтверждают наше впечатление, что при одном и том же неизменном источнике непрерывного звука, например речи или музыки, уровень звука в комнате выше, чем на открытом воздухе.

Продолжим еще немного рассмотрение этого вопроса, считая, что в нашем распоряжении имеется магнитофон с магнитной лентой (быть может, вы позаимствуете его у приятеля или в школе). Желательно иметь также удлинительный шнур, длиной около 15 м, для того чтобы можно было включать и выключать магнитофон как из комнаты, так и находясь на некотором расстоянии от здания. Какого же рода звуки будем мы сравнивать между собой в обоих случаях, чтобы узнать возможно больше о том, каково звучание при наличии и при отсутствии эхо и реверберации? Речь или музыка очень хороши для составления общего представления об этих эффектах. Но не существует двух отрывков, состоящих из точно тех же групп звуковых волн, и будет трудно сравнивать тембр звучания различных нот, слов и слогов одной и той же записи, прослушивая ее один раз в комнате и другой раз на открытом воздухе. Мы могли бы при помощи микрофона записать на ленту длительную ноту, издаваемую голосом или каким-нибудь музыкальным инструментом. Однако трудно сделать действительно равномерную запись без колебаний громкости. Наилучшее решение — это сделать кольцо из магнитной ленты так, чтобы она образовала петлю, охватывающую обе катушки магнито-

фона, что позволит проигрывать один и тот же кусок записи сколько угодно раз подряд.

Этот опыт позволит сразу же продемонстрировать один из важных эффектов, связанных с эхо в помещении. Если медленно двигаться в обычной жилой комнате, в которой звучит поддерживаемый на постоянном уровне пронзительный высокочастотный тон, то, внимательно прислушиваясь, можно услышать, что громкость тона будет то повышаться, то понижаться на правильных расстояниях. Особенно интересно наблюдать этот эффект, медленно передвигаясь вблизи центра комнаты, в то время как магнитофон, помещенный в конце комнаты, издает тон на две-три октавы выше среднего  $C_1$ . Сравнение громкости легче производить, закрыв одно ухо так, чтобы слышать звук только другим ухом. Тогда обычно удается ясно расслышать нарастание и спадание уровня звука, а при усиленном внимании — оценить также расстояние между смежными точками наибольшей громкости. Подвешенная горизонтально на уровне глаз линейка с делениями позволит легче установить, на какое расстояние нужно сместить ухо, чтобы перейти от одной точки наибольшей громкости к соседней.

Произведя наблюдения колебаний уровня громкости тона, воспроизводимого магнитофоном в закрытой комнате, повторите этот опыт на открытом воздухе. Вы услышите здесь, что не только тон звучит слабее, но и что колебания его уровня почти исчезли. Громкость будет монотонно убывать по мере удаления от громкоговорителя. Подобный простой опыт показывает, что в комнате происходит взаимодействие волн, отраженных от стен, с волнами, приходящими непосредственно от магнитофона, и что в одних местах имеется усиливающая интерференция, дающая максимальные уровни громкости звука, а в других — ослабляющая интерференция, создающая зоны относительной тишины.

Можно обнаружить далее, что в случае практически чистого тона (одна определенная частота) расстояние между двумя соседними максимумами громкости равно *половине длины волны*. Для этих опытов удобно выбрать тон  $C_3$  с частотой 1024 *гц*, на две октавы выше среднего  $C_1$ , так как длина волны этого тона близка к 30 *см*. Если выбрать значительно более низкий тон, например, тон с частотой 100 *гц*, то длина волны будет равна  $\lambda = \frac{v}{f} = \frac{344}{100} = 3,4$  *м*, т. е. будет равна размерам комнаты или больше их. Для значительно более



высокого тона, например, тона с частотой 10 кгц, длина волны будет равна  $\lambda = 344/10\ 000 = 0,034$  м или 3,4 см и соседние максимумы или минимумы так близки, что их трудно будет обнаружить. Ноты, издаваемые музыкальными инструментами, содержат столько частот, или гармоник, дающих каждая свои максимумы и минимумы, расположенные на интервалах, отвечающих своей длине волны, что будет трудно разобрать, где громкие и где тихие места для каждой частоты в отдельности. Поэтому чем чище тон, тем более наглядно проявляется этот эффект. Для таких опытов флейта подходит больше, чем фортепиано или скрипка, так как она дает более чистые тоны.

Эта картина максимумов и минимумов получила название *стоячих волн*. В точках наибольшей громкости волны, отраженные от стен, прибавляются к звуковым волнам, приходящим непосредственно от громкоговорителя. Если в данную точку приходят волны, отраженные от различных участков стены, то эти отдельные эхо, вероятнее всего, придут в различные моменты времени, и вызванное ими усиление звука будет меньше, чем если бы они все пришли одновременно. В некоторых помещениях неправильной формы стоячие волны могут быть слабо выражены, однако большинство комнат имеет достаточно правильную форму и достаточно хорошо отражающие стены, чтобы по крайней мере в центре комнаты можно было обнаружить стоячие волны. Если вы имеете возможность произвести опыты с водяной ванной, применяемой для демонстрации различных волновых движений при помощи поверхностных волн, то увидите, что для получения ясно выраженных стоячих волн частота колебаний объекта, создающего эти волны, должна быть очень тщательно подобрана. В противном случае на поверхности воды получается беспорядочная картина отдельных волн, бегающих одна за другой вперед и назад без всякого порядка. Если форма ванны отличается от простой, например прямоугольной, формы, то картина стоячих волн либо получается очень сложной, либо наблюдается лишь в отдельных зонах, в которых волны отраженные усиливают волны, приходящие непосредственно от источника.

Предположим, что мы хотим получить в комнате стоячие волны для звука, содержащего не одну, а несколько различных частот. Речь и музыка подошли бы для опыта, но в них отдельные частотные компоненты меняются слишком быстро, и это усложняет картину. Однако, хотя обычно мы не

замечаем стоячих волн при слушании речи или музыки, в очень больших помещениях возможны так называемые «мертвые зоны», где в результате интерференции между прямыми и отраженными звуковыми волнами слушать затруднительно и неприятно. Недаром целая наука — архитектурная акустика — занимается вопросами уменьшения до минимума подобных «мертвых зон» и стремится обеспечить такое распределение отражений от стен зала, чтобы речь и музыка доносились до всех мест в зале возможно более точно.

Эффекты, вызываемые одновременным наличием в помещении нескольких частот, можно продемонстрировать на простом опыте с магнитофоном. Если записать на магнитофонную ленту громкий свист и затем проиграть эту запись, то в помещении зазвучит еще более громкий свист. Однако услышать стоячие волны, вероятно, будет очень трудно. Иногда для этого же опыта можно воспользоваться радиоприемником или проигрывателем, увеличивая усиление до тех пор, пока не послышится свистящий звук, возникающий благодаря беспорядочному движению электронов в каком-либо из элементов электронной цепи. Этот свист, подобно свисту, производимому человеком, содержит большой набор частот, примерно одинаковой громкости каждая. Для каждой длины волны устанавливается *своя* стоячая волна, но места наибольшей громкости для волн разной длины не будут совпадать друг с другом, так что в итоге суммарный уровень громкости будет примерно одинаков во всем помещении. Отчетливые стоячие волны могут получиться только тогда, когда в звуке, наполняющем помещение, есть одна или только малое число разных длин волн.

Может случиться, что в то время, как вы наблюдаете стоячие волны, в помещение кто-нибудь войдет. Часто это вызовет сдвиг положений максимумов и минимумов звука, даже если комната сравнительно велика. Это — более сложный тип взаимодействия, в котором на точное положение мест наибольшей интерференции влияют все объекты, посылающие отраженные звуковые волны в добавление к волнам, приходящим непосредственно от магнитофона. Это изменение картины стоячих волн можно использовать именно как признак того, что в комнату кто-то вошел. Обычно это можно установить более легким путем, однако в некоторых случаях изменения картины стоячих волн действительно использовались для обнаружения малых изменений

положения предметов в комнате. Например, так действует один из видов сигнализации о появлении взломщиков. Представьте себе, далее, что вы расхаживаете с завязанными глазами в комнате. Наличие стоячих волн скажет вам, по крайней мере, что вы находитесь в комнате, а не на открытом воздухе, где нет ничего, что отражало бы достаточно звука для образования стоячих волн. Если стоять неподвижно, то по сдвигу картины стоячих волн вы сможете узнать о том, что в помещении появился какой-то новый предмет.

Эти примеры могут показаться пустячными, однако слепые люди приучаются обращать внимание на всевозможные свойства окружающего звукового поля и этим способом узнают многое о происходящем вокруг них. Имейте также в виду, что эти примеры были выбраны из-за их простоты, и от такого упрощенного начала можно перейти к значительно более трудным задачам, ответы на которые мы сможем дать по мере дальнейшего развития опытов. Существо дела в том, что звуковые волны используются как *инструмент* или «удлинитель органов чувств» для исследования окружающей обстановки. Грубые инструменты, применяемые с малым умением, дадут только грубые сведения. Однако, как мы уже видели, даже такие мелкие зверьки, как летучие мыши, стали великими мастерами по использованию звуковых волн как инструмента, дающего им возможность получать довольно сложные сведения об их окружении. Они приобрели свое мастерство в результате длительной эволюции, благодаря тому, что звук является удобным, если не единственным способом ориентировки в тех условиях, в которых им приходится жить и передвигаться.

Выяснить, находитесь ли вы в комнате или на открытом воздухе, путем вслушивания в звучание пронзительного дрящегося тона, записанного на магнитофоне,— это, конечно, громоздкий способ установления весьма наглядного обстоятельства! Но представьте себя в положении человека, заблудившегося в крошечной тьме пещеры и не имеющего никаких источников света. Для него звуковые волны будут полезным, если не единственным средством узнать хотя бы что-нибудь о тех частях пещеры, которые лежат за пределами непосредственной досягаемости его вытянутых рук или ног. Летучие мыши не нащупывают дорогу: они быстро летают по сложным извилистым переходам пещер, избегая столкновений с другими летучими мышами и сталактитами; как я поясню позднее, это — еще наименее трудные из

многих задач, разрешаемых летучими мышами при помощи звуковых волн.

При дальнейшем изучении нашей проблемы полезно будет от времени до времени возвращаться к простым опытам со слышимым звуком, вроде описанных выше. Это позволит вам убеждаться на собственном опыте в правильности понятий и теорий, о которых вы прочтете. Для многих целей более удобны поверхностные волны в водяной ванне, применяемой для демонстраций в школьном преподавании, позволяющие наблюдать эти же явления зрительно. Объясняется это, главным образом, малой скоростью поверхностных волн, благодаря чему их удается наблюдать простым глазом. Кроме того, их скорость зависит от глубины воды, и, устанавливая в ванне «песчаные отмели» или «риффы», можно заставить волны преломляться. В такой ванне можно изучать также и эхо, вполне аналогичные отражениям звука, вызывающим стоячие волны, или используемым летучими мышами и человеком для ориентировки в отсутствие освещения.

### **Волны на поверхности воды и их отражения**

Поверхностные волны на воде во многом, вплоть до подробностей, схожи со звуковыми волнами в воздухе, а также со световыми волнами. Если, однако, не касаться их роли в качестве моделей замедленного волнового движения, мы мало интересуемся волнами на поверхности воды и уж во всяком случае не считаем их способными переносить информацию. Кому придет в голову пытаться переговариваться через океан при помощи поверхностных волн? Эти волны слишком быстро замирают и их очень легко спутать с естественными волнами, возникающими под действием ветра или течений. От листа, упавшего на неподвижную поверхность воды в пруду, побегут круги, но можно ли надеяться обнаружить их с расстояния в сотню футов? Однако, исходя из их сходства с звуком и со светом, мы можем ожидать, что поверхностные волны на воде, изучаемые нами в физической лаборатории, также в какой-то степени способны переносить информацию. Если поискать в природе, то можно найти подтверждение этого. И действительно, изучение водяного жука (вертячки) позволяет рассмотреть с единой точки зрения волны в водяной ванне и работу самых сложных радиолокаторных установок.

Вертячки — обычные жители небольших прудов и спокойных ручьев. Эти водяные насекомые часто ныряют и плавают под водой, но легче всего их увидеть, когда они носятся по поверхностному слою воды. Они достаточно легки и поддерживаются поверхностным натяжением воды, в основном благодаря волосяному покрову, который покрыт у них несмачиваемым воскообразным веществом. Их способность держаться на воде легко смогла бы увести нас к вопросам о поверхностном натяжении и о том, почему вода — единственная жидкость, на поверхности которой могут держаться водяные жуки. Но этот вопрос хорошо освещен в другой книге данной серии <sup>1)</sup>.

Для нас большой интерес представляет тот факт, что водяные жуки используют поверхностные волны для того, чтобы узнавать о близости границы поверхности воды. У них есть глаза и они во многих случаях пользуются зрением, но ночью или во время лабораторных опытов, проводимых в темноте, все же ухитряются ловко избегать столкновений со стенками аквариума и друг с другом. В 1920 г. немецкий биолог Фридрих Эггерс тщательно изучал этих жуков. В отличие от большинства других насекомых, эти жуки имеют усики (антенны) особой формы, наиболее приспособленной для плавания на поверхностной пленке воды. Многочисленные волоски расположены параллельно друг другу как раз под таким углом, что они плавают на поверхностной пленке. Еще более специально назначение волосков, покрывающих второе от основания сочленение усика. Они не только создают плавучесть: у их основания находятся чувствительные нервы, возбуждаемые при самых малых перемещениях волосков относительно тела жука. Основываясь на микроструктуре этих волосков и нервов (рис. 5), Эггерс высказал предположение, что они служат для обнаружения движений водной поверхности, и приступил к соответственным прямым опытам. У некоторых особей он повреждал вторые сочленения усиков, срезая на них волоски, у других — повреждал только нервы, ведущие от оснований этих волосков к центральной нервной системе насекомого. Когда затем поврежденных насекомых выпускали на поверхность воды в темноте, они беспорядочно двигались подобно птице, бьющейся об оконное стекло, и в своих случайных блужданиях наталкивались на стенки аквариума.

---

<sup>1)</sup> Ч. Б о й с, «Мыльные пузыри», Детиздат, М., 1936. (Ред.)

Другие опыты показали, что органы чувств насекомого способны воспринимать очень слабые колебания. Некоторые насекомые, по строению очень похожие на вертячку, могут обнаруживать при помощи чувствительных нервов, связанных с тонкими волосками на поверхности тела, ничтожные перемещения порядка  $4 \cdot 10^{-9}$  см. Таким образом, нет ничего удивительного в том, что водяные жуки способны ощущать поверхностные волны, вызываемые их собственным плаванием или беганьем по поверхности воды. Что действительно

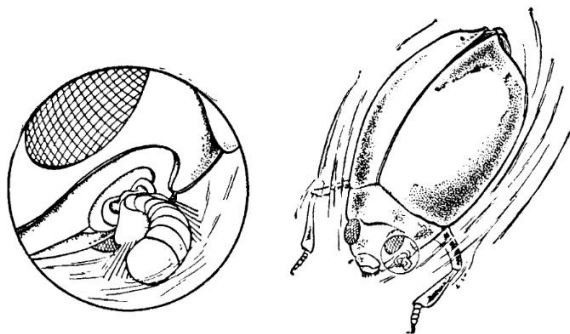


Рис. 5. Водяной жук (вертячка), остальные ножки которого спрятаны под телом, обладает двумя специальными усиками, которые лежат на воде и воспринимают поверхностные волны и их эхо. Интересно отметить, что у этого жука четыре сложных глаза — два под водой и два над водой.

поражает — это их способность отличать сотрясения, вызываемые отраженными волнами, от всех других колебаний, которые должны воздействовать на те же волоски и чувствительные нервы. Возможно, что жуки в значительной мере обходят это затруднение тем что они обычно плавают с перерывами, делая частые паузы, во время которых, быть может, и происходит восприятие «реверберации» поверхностных волн, вызванных за долю секунды до этого движением жука. Однако после Эггерса никто больше пока еще не занимался изучением навигации водяных жуков; это говорит о перспективах, которые еще могут раскрыться перед терпеливыми и изобретательными учеными-биофизиками.

В следующих главах я подробнее опишу более известные примеры получения большого количества сведений путем восприятия эхо как животными, так и человеком; станет ясно, что органы чувств и мозг живых существ способны

обнаруживать эхо, на первый взгляд слишком слабые, чтобы их можно было как бы то ни было использовать. Суть дела в том, что оказывается возможным различить или отсеять слабые, но полезные эхо от гораздо более интенсивных волн того же типа, но которые для цели, преследуемой данным животным, интереса не представляют. Тонкость распознавания самых различных явлений нервной системой живого существа превосходит соответственную способность искусственных механизмов. В следующей главе будут описаны доступные читателю опыты, показывающие, как человеческое ухо и мозг различают звуки разных видов, включая и эхо.

---

## ГЛАВА 3

### ЭХО СЛЫШИМЫХ ЗВУКОВ В ВОЗДУХЕ

Слово «эхо» наводит на мысль о тихой деревенской местности, где на расстоянии нескольких сотен футов вырисовывается крутая скала или скл<sup>о</sup>н холма. Тишина внезапно нарушается криком или выстрелом из ружья, за которым следует ослабленное повторение этого звука. Если мы точно измерили промежуток времени от момента возникновения исходного звука до прихода первого эхо, то, зная скорость звука, мы сможем найти расстояние до косогора. Если холм достаточно велик и находится на достаточно большом расстоянии, так что эхо от него доходит к нам только через несколько секунд, то можно воспользоваться секундомером. Если холм расположен слишком близко, то промежуток времени слишком мал и его трудно будет измерить точно; если холм слишком далеко, то эхо может оказаться совсем неслышным.

Часто оказывается, что кругом расположено слишком много холмов и они дают многократные эхо, а если при этом первое эхо накладывается на конец исходного звука, или если слышна реверберация от близрасположенных объектов, то точное измерение делается затруднительным. Не всегда легко также решить, от какого именно холма пришло эхо. Часто оказывается легче отметить момент прихода эхо, а затем по крупномасштабной карте местности опознать на соответственном расстоянии подходящий крутой скл<sup>о</sup>н. Почти всегда наше внимание отвлекают всякие посторонние звуки. Поэтому отчетливые эхо всегда считались какими-то особыми звуками, которые можно услышать только в наиболее благоприятных условиях.

Мелким каботажным судам, плавающим в прибрежных водах в туманную погоду, эхо может оказать большую



услугу. В туман обычно бывает безветренно; кроме самого судна, никаких отражающих поверхностей нет до самого берега. Попавшие в туман рыбаки, оценивая расстояние до крутого берега и скал примерно в милю, производят короткий громкий звук, для того чтобы вызвать отчетливое эхо. Иногда они пользуются гудком или свистком, которые по законам о судоходстве должны иметься на каждом судне для сигнализации другим судам; иногда достаточно просто громко крикнуть. По уверениям некоторых рыбаков, они могут слышать эхо от фарватерных буев (диаметром около 3 футов) с расстояния порядка нескольких сотен футов.

Эффективность этого навигационного средства ограничивается тем, что в местах подводной опасности может не оказаться отражающих поверхностей в воздухе. Подводные скалы опасны и тогда, когда они не доходят до поверхности воды, а береговая линия обычно слишком пологая, чтобы создавать отчетливое эхо. Современная навигационная аппаратура использует этот же принцип действия для звука под водой, вытеснив из практики воздушное эхо. Звуковые волны излучаются в воду из корпуса судна, а волны, отраженные от дна или от мелководья впереди по ходу судна, регистрируются приборами. Такие устройства для подводной эхолокации получили название *эхолотов*. Усовершенствованные модели эхолотов позволяют обнаруживать даже рыбные косяки. Общими для всех этих методов являются: излучение «лоцирующего» звука, восприятие эхо, отраженного объектом, и, самое главное, определение расстояния от отражающего объекта и направления на него.

### Акустика щелчков и их эхо

Так как почти все предметы заметно отражают звук, то наших ушей редко достигают звуки, не изукрашенные эхо. Почему же мы так редко замечаем самые эхо? Дело в том, что они очень редко слышны отдельно, т. е. очень редко доходят до нас после прекращения исходных звуков. Обычно эхо и исходные звуки перемешаны, и большей частью мы не умеем различать эти два класса звуковых волн. Описанные в предыдущей главе простые опыты с портативным радиоприемником или магнитофоном показали, что в помещениях имеются эхо, которые меняют звучание тональных звуков или шумов. Громкость звука возрастает за счет сильных отражений от стен и за счет образования стоячих волн при

звучании чистых тонов. Здесь важно подчеркнуть, что потребовались специальные опыты для того, чтобы мы смогли убедиться сами в действительном наличии эхо в составе самых знакомых звуков. Эхо ускользают от нашего внимания в такой полной степени главным образом потому, что в обычных местах восприятия звука длительность большинства звуков относительно велика по сравнению со временем их пробега до отражающего предмета и обратно. Даже на берегу горного озера, распевая песни у костра на привале, мы вряд ли заметим эхо, потому что оно окажется замаскированным последующими звуками песни. Только когда песня внезапно оборвется, эхо, приходящее от холмов, дойдет до нашего сознания. Наша неспособность различать эхо в обычных условиях и объясняется в значительной мере тем, что оно маскируется длительным звучанием исходного звука.

Однако все звуки рано или поздно замирают и наступают паузы или короткие интервалы тишины. Почему же мы и тогда не слышим эхо? Предположим, что мы попытаемся исследовать физическую сторону этого вопроса при помощи чувствительного микрофона, преобразующего энергию звуковых волн в энергию электрических напряжений. Предположим далее, что мы подключим этот микрофон к катодно-лучевому осциллоскопу, почти мгновенно воспроизводящему на своем экране график звуковой волны. Катодно-лучевой осциллоскоп — это предшественник вашего телевизора. Внутри телевизионной трубки создается световое пятно; одна электрическая цепь все снова и снова передвигает его равномерно по горизонтали слева направо; другая цепь смещает пятно вертикально вверх и вниз. В нашем примере вертикальное смещение пятна управляется напряжением, которое снимается с микрофона и затем усиливается. Благодаря одновременному движению в вертикальном и горизонтальном направлениях световое пятно буквально вычерчивает на экране осциллоскопа график зависимости звукового давления от времени.

При помощи такого осциллоскопа мы можем следить за поведением звуковых волн в самый момент произнесения звуков. Если мы внезапно перестанем говорить, то может показаться, что световое пятно прекратит движение в тот же момент. Однако, если осциллоскоп установлен в большом помещении, то, пристально следя за поведением пятна, мы увидим, что в течение короткого промежутка времени пятно

еще чертит все сжимающуюся кривую звуковых волн, продолжающих бегать мимо микрофона от стены к стене. Так как скорость звука в воздухе достигает 344 м/сек, так как при каждом отражении звуковой волны от стен и пола возвращается менее 100% звуковой энергии и так как энергия звуковых волн постепенно истощается за счет трения в воздухе, то это послезвучание эхо длится лишь долю секунды. Однако это послезвучание существует, и мы можем наблюдать его на экране осциллоскопа, несмотря на то, что наш слух как будто его не воспринимает.

Пользуясь приборами, мы можем более точно, чем просто следя глазами, судить о том, как быстро убывает уровень звука и как долго звук продолжает оставаться доступным нашему наблюдению. Самым простым способом является фотографирование движения пятна на экране осциллоскопа при помощи фотокамеры, в которой пленка движется с постоянной скоростью. При движении вверх и вниз светового пятна, отображающего воздействие звуковых волн на микрофон, на движущейся фотопленке вычертится график зависимости звукового давления (вертикальная ось) от времени (горизонтальная ось). Полученное графическое изображение картины звуковых волн ясно показывает, что эхо продолжает приходить к микрофону еще в течение значительной доли секунды по прекращении звуков, пришедших непосредственно от рта говорящего. Подобные фотографии показывают также, что слово, произнесенное нами в комнате, сопровождается более сильными эхо, чем это же слово, произнесенное на открытом воздухе. На рис. 6 приведен соответственный пример, но даже в этом случае, когда произнесенное слово было коротким, эхо начало смешиваться с исходными звуковыми волнами задолго до конца слова.

Несмотря на такое различие в фотографической картине, в обоих случаях слово звучит почти одинаково. Снова — тот же поразительный факт: требуются специальные доказательства для убеждения нас в том, что наборы звуковых волн в обоих случаях — не одни и те же. Мы без всякого труда узнаём, что это за слово и кто его произнес; звучание в квартире почти не отличается от звучания на улице. Почему же не отличается? Другой простой опыт с магнитофоном объяснит здесь многое.

Поставим микрофон в комнате (или, еще лучше, в большом коридоре или классной комнате с твердыми стенами) и запишем короткий резкий звук. Проиграв полученную

запись, услышим довольно верное воспроизведение звука. Предположим, что запись содержит несколько повторений коротких слов, оканчивающихся на твердые согласные, например: «рот», «бок», «суд» или «бег». Можно было бы также записать резкие щелчки, издаваемые большими ножницами или щипцами. Можно также воспользоваться хорошим предлогом и пострелять из пугача. Но во всяком случае

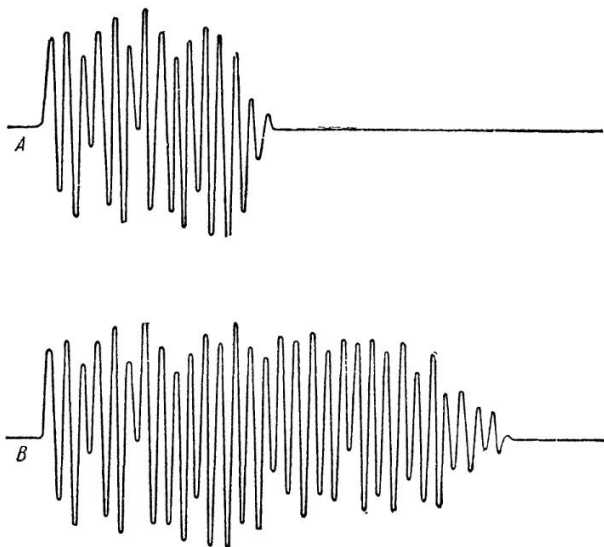


Рис. 6. График звукового давления для очень короткого слова в отсутствие эхо (А) и в присутствии эхо (В). Обратите внимание на одинаковость первых волн и на различие, вызванное приходом эхо еще до того, как окончилось звучание исходного слова.

нужно, чтобы на записи были интервалы тишины в несколько секунд между двумя последовательными звуками.

Когда такая запись сделана, *проиграйте ее в обратном направлении*. Иначе говоря, перемените катушки местами так, чтобы при проигрывании записи задний конец ленты шел впереди. Теперь лента должна сматываться с той катушки, на которую она раньше наматывалась, и, наоборот, наматываться на ту, с которой раньше сматывалась. В некоторых магнитофонах при этом придется перевернуть катушки вверх ногами, чтобы к записывающей головке была

обращена одна и та же сторона ленты; в этих моделях при записи намагничивается лишь одна половина ленты и при обратном проигрывании она не пройдет под воспроизводящей головкой. В этом случае необходимо перевернуть ленту так, чтобы к головке была обращена ее блестящая сторона, а не матовая. Уровень звука при этом понизится, но это можно возместить регулятором громкости, и опыт удастся, хотя и не так хорошо, как с лентой, намагниченной по всей ширине.

При проигрывании записи в обратном направлении эхо, которые раньше следовали за исходным словом или щелчком, будут, разумеется, ему предшествовать. Поскольку они раньше почти не были заметны, естественно ожидать, что и теперь они явятся лишь слабым вступлением к перевернутому исходному звуку. Но в действительности оказывается, что слышимая громкость эхо оказывается поразительным образом возросшей. Резко звучащий щелчок (или его воспроизведение при нормальном проигрывании) теперь превратился в постепенно нарастающий свист, завершающийся щелчком. Самый щелчок звучит более или менее одинаково при проигрывании в обоих направлениях, но перевернутые эхо стали гораздо более заметны. Настолько более заметны, что когда вы их слушаете, то трудно поверить, чтобы здесь не было какой-нибудь каверзы со стороны магнитофона, и что это уууууШК! действительно есть тот же самый звук, что и исходный резкий щелчок.

При таком проигрывании записи в обратном направлении обнаруживается истинная интенсивность эхо различных звуков. Для речи или музыки, которые при обратном проигрывании всегда звучат неестественно, интенсивность эхо труднее оценить. Щелчки или звуки пистолетных выстрелов так коротки, что состоят лишь из нескольких неправильных звуковых колебаний, звучащих почти одинаково при проигрывании в обоих направлениях. Это можно проверить, повторив запись на открытом воздухе в тихом месте, далеко от больших зданий. Здесь щелчки будут сопровождаться лишь слабыми эхо от земли и от небольших объектов, как кусты и деревья. При обратном проигрывании получится звучание, более близкое к исходным щелчкам, чем на записи, сделанной в помещении. Короче говоря, этот опыт показывает, до какой степени наше чувство слуха подавляет восприятие эхо. Мы ясно слышали бы эти звуковые волны, если бы они звучали отдельно, и совершенно их

не замечаем, когда они составляют часть эхо, пришедшего через несколько десятых долей секунды после исходного звука. Этим в значительной мере объясняется, почему произнесенное слово или другой звук звучат почти одинаково как в комнате с сильными отражениями от стен, так и на открытом воздухе, где эхо либо очень слабое, либо совсем отсутствует. Разница, конечно, есть, и если внимательно прислушаться, то можно заметить, что в закрытой комнате голос звучит не только громче, но и полнее по тембру. Всем хорошо знаком гулкий звук шагов в помещении без мебели и без драпировок. Все это связано с присутствием или отсутствием сильных эхо.

Механизм подавления эхо составляет одну из многих тонких загадок человеческого уха и мозга, и никто не понимает, как осуществляется его действие. Подавление длится лишь малую долю секунды. Было показано, что подавление проявляется сильнее всего сразу же после окончания прямого звука; затем оно постепенно ослабевает и спустя примерно полсекунды ухо снова воспринимает в полной мере последующие звуки. Если кругом тихо, то эхо от дальнего холма, пришедшее через 4—5 секунд после прекращения исходного звука, легко услышать. Но мы не услышали бы эхо той же силы, пришедшее через  $1/10$  секунды после исходного звука. При проигрывании магнитофонной записи в обратном направлении мы уводим эхо из того интервала времени, когда действует наш механизм подавления.

Пытаясь выяснить, каково звучание эхо, желательно пользоваться звуками малой продолжительности, просто потому, что тогда для них будет меньше шансов оказаться перекрытыми и полностью замаскированными исходным звуком. Звуки произносимых слогов или щелканье ножниц недостаточно коротки для получения наилучших результатов. Всякий звук короче примерно  $1/10$  секунды называют щелчком; при достаточном уровне энергии щелчок он звучит тем резче, чем меньше его длительность. Однако человеческий голос или какой-либо другой обычный источник звука не способны производить действительно короткие щелчки. Очень резкий щелчок дает электрическая искра, возникающая при разряде конденсатора, и почти такой же резкий щелчок получается при разряде конденсатора через громкоговоритель, если только электрическая цепь не оказывается в резонансе и не продлевает колебаний диафрагмы громкоговорителя.

Более дешевым и широко доступным источником резких щелчков является обыкновенная детская игрушка — так называемая «лягушка», или «сверчок», представляющая собой тонкую полоску рессорной стали с вмятиной посредине. Один конец полоски крепко зажат в держателе, второй свободен и на него можно нажимать в ту и другую сторону, сгибая и разгибая полоску. Когда палец сгибает полоску, вмятина скачком выгибается в обратную сторону, так что выпуклая сторона делается вогнутой, и обратно, и при этом воздуху сообщается мгновенный энергичный толчок. В результате получается очень громкий и резкий хлопок или щелчок, способный причинить болевое ощущение; а быть может, при многократном повторении, и повредить слух, если хлопок производить над самым ухом.

Различные модели такой хлопушки дают хлопки разной длительности; играют роль размеры и форма держателя. В испытанных мною маленьких хлопушках уже через 10 миллисекунд после перескакивания вмятины звук падает до  $1/10$  начального максимального значения. Если вспомнить, что скорость звука в воздухе равна примерно 1 футу в миллисекунду, то можно подсчитать, что хлопок, длящийся 10 миллисекунд, растягивается при распространении в воздухе почти на 10 футов. Это означает, что отражение от стены, расположенной на расстоянии 5 футов, достигнет слушателя как раз в тот момент, когда последние звуки, составлявшие хлопок, покинули хлопушку. Если бы хлопушка создавала звук длительностью в 1 миллисекунду, то перекрытие эхо с исходными звуками прекратилось бы на расстояниях до отражающей стены, превышающих всего 6 дюймов.

Интересное дело — обзавестись такой хлопушкой и наблюдать эхо! Даже обыкновенные игрушки, хлопки от которых длятся по 10 миллисекунд, многое добавляют к сведениям, полученным нами из опытов с эхо от произносимых слов. В этих опытах важно усилить до максимума слышимость эхо и в то же время понизить уровень исходного звука, непосредственно достигающего наших ушей. Часть уже упомянутого ранее эффекта подавления эхо — это весьма кратковременное понижение чувствительности нашего уха после прихода очень громкого звука, а эти хлопушки на небольшом расстоянии издают действительно чрезвычайно громкий звук. Лучше взять хлопушку обеими руками,

сложенными в виде лодочек, так, чтобы образовался рупор, обращенный отверстием вперёд и заслоняющий уши. Хлопки будут еще ясно слышны, но главная часть их звуковой энергии будет направлена прямо вперед. Проигрывая в обратном направлении запись этих хлопков, можно наблюдать все описанные выше поразительные явления. Во время записи микрофон должен находиться позади сложенных рук, образующих рупор, чтобы условия для записи эхо также были более благоприятны, чем для исходного звука хлопка. Эхо таких очень коротких хлопков можно слышать непосредственно без всякого магнитофона, без обратного проигрывания.

Такую зажатую в сложенных руках хлопушку интересно использовать и на открытом воздухе. Если руки с хлопушкой обращены прямо в сторону здания, расположенного на расстоянии около 50 футов, то легко можно услышать отчетливое отдельное эхо. Таким же образом можно получить отчетливые эхо от деревьев диаметром примерно в фут и от других подобных объектов. Начинаящему экспериментатору лучше всего медленно прохаживаться взад и вперед, производя один-два хлопка в секунду. Несколько минут внимательного прислушивания покажут, как много можно узнать об объектах таких размеров, если только они достаточно удалены, чтобы эхо отчетливо отделялось от исходных хлопков. Опыт покажет, что легче всего распознать эхо, когда в окрестности имеется только одна большая отражающая поверхность. Несколько деревьев во дворе, окруженном большими зданиями, дадут многократные эхо, и чтобы выяснить принадлежность каждого из эхо, нужно тщательно в них разбираться.

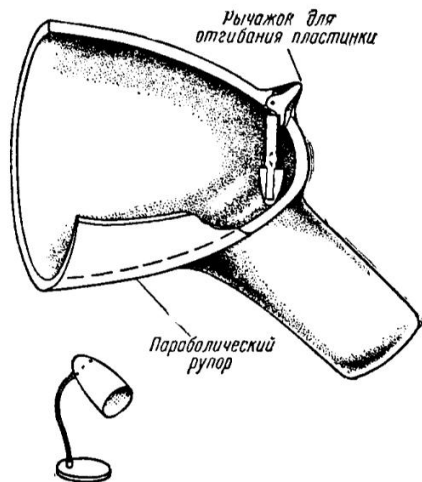
При этом опыте у вас вскоре начнутся судороги в руках, вызванные их неестественным положением, когда они одновременно приводят в действие хлопушку и играют роль рупора. Нетрудно снабдить хлопушку небольшим рупором из картона, легкого металла или пластмассы. Идеальной формой рупора был бы, пожалуй, параболоид, но достаточно глубокий конус также дает довольно хорошие результаты. Самое главное требование, которому должен удовлетворять рупор,— это возможность сгибать в одну и в другую сторону стальную пластинку с вмятиной, не открывая заднюю стенку рупора, иначе громкие хлопки непосредственно достигали бы уха экспериментатора. Одно из подобных устройств показано на рис. 7.



Когда вы научитесь при помощи эхо обнаруживать деревья и постройки, то поупражняйтесь на легко распознаваемой цели, например такой, как большое здание. Приближайтесь к зданию, производя хлопки. Если вы не совсем уверены в том, что слышите эхо, то завяжите глаза или просто закройте их. Вы окажетесь тогда почти в том же положении, что и слепой человек, пытающийся найти дорогу при помощи эхо. Многие слепые полностью овладели этим способом и успешно им пользуются.

Приближаясь к зданию с расстояния в 15—25 м, вы сначала будете отчетливо слышать раздельное эхо, однако постепенно оно сливается с исходным звуком, и наконец, вы при всей усилении не сможете различить эхо. Тогда вам нужно повернуться в другом направлении, где нет больших отражающих объектов, и сделать еще несколько хлопков. Но теперь хлопки будут звучать по-иному, и в случае сомнений это можно проверить, наводя хлопкушку то в сторону здания, то в другом направлении.

Рис. 7. Весьма удобный прибор для изучения эхо можно изготовить, как показано на рисунке. Внутренняя поверхность рупора должна иметь форму параболоида вращения, а хлопушка должна располагаться в фокусе параболы. Рупор можно изготовить, нанося застывающую пластмассу на гипсовую форму. Удобны также параболические рефлекторы настольных ламп.



После того как различие будет уловлено, подойдите к зданию еще ближе, снова направляя хлопушку то прямо на здание, то в других направлениях, где нет отражающих объектов. Удивительно, насколько близко можно подойти к зданию и все еще ясно слышать разницу в звучании хлопков, когда хлопушка направлена прямо на стену и когда она направлена в сторону от нее. На очень малых расстояниях, например ближе 10 футов, звуки будут различаться только громкостью. Здесь эхо достаточно интенсивно,

чтобы повысить громкость хлопка, с которым оно сливается. Вот почему так важна роль рупора, защищающего вас от прямого звука; если бы можно было изготовить идеальный рупор, так чтобы *вся* звуковая энергия щелчка миновала наблюдателя, то распознавание эхо стало бы безшибочным.

Здесь полезно будет отклониться несколько в сторону и заняться вопросом о длинах волн слышимых звуков и о соотношении между длиной волны и осуществимыми размерами рупора, направляющего звук хлопка вперед. Все виды волнового движения имеют общее свойство: правильное зеркальное отражение волн может быть получено только от объектов, размеры которых превышают одну длину волны. Поверхностные волны, возбуждаемые в демонстрационной кювете или в обыкновенной ванне, могут отражаться от краев ванны или от других объектов длиной в несколько сантиметров. Эти отражения подчиняются тем же законам, что и световые волны; например, угол отражения от плоской поверхности равен углу падения. Но получаются совершенно другие результаты, когда размеры отражающего объекта равны одной длине волны или меньше ее. Тогда наблюдаются вторичные волны, которые можно назвать эхо, исходящие во всех направлениях от малого объекта. Интенсивность этих отраженных волн довольно сложным образом зависит от направления; зависимость определяется формой объекта и, в особенности, соотношением между его размерами и длиной волны. Если же размеры отражающего объекта гораздо меньше одной длины волны, то его форма роли почти не играет. Ниже я опишу простые опыты с хлопушкой, из которых будет видно, что те же законы применимы и к слышимым звуковым волнам. Когда эхо разбегаются по всем направлениям от объекта, малого по сравнению с длиной волны, то часто говорят не об отраженном, а о *рассеянном* звуке.

Мы отклонились в сторону для того, чтобы выяснить, как влияет длина волны на способность рупора направлять звук прямо вперед. Рупор — это специальное акустическое зеркало; его форма должна обеспечивать такое отражение звуковых волн, возбуждаемых внутри него, чтобы они усиливали друг друга и выходили из отверстия рупора в виде параллельных волновых фронтов, бегущих в одном направлении. Если звук создается в одной точке, то концентрация всех волн в одном направлении лучше всего достигается

при параболической форме рупора. Для такого рупора все продольные осевые разрезы суть параболы, в фокусе которых расположен источник звука. Согласно одному из геометрических свойств параболы, всякий луч, исходящий из фокуса, встречается с поверхностью параболического рупора под таким углом, что после отражения (под углом, равным

углу падения) он идет параллельно оси параболы.

Рис. 8 может помочь разобраться в этой несколько сложной, на первый взгляд, картине. Собственно говоря, здесь нет ничего нового, так как примерно по тому же принципу устроены прожекторы, ручные фонарики и автомобильные фары. Однако в ходе рассуждений мы исходили из важного предположения о том, что звуковые волны, создаваемые в фокусе параболического рупора, будут действительно отражаться от его поверхности под углом, равным углу падения. Это справедливо только для длин волн, малых по сравнению с размерами отражающей поверхности. Если длина волны гораздо больше размеров рупора, то он будет оказывать очень слабое направляющее действие на звуковые волны.

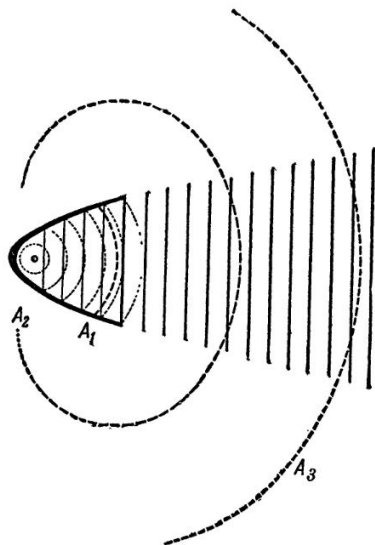


Рис. 8. Когда длина волны звука больше диаметра устья рупора (низкочастотный звук, волны которого обозначены буквами  $A_1, A_2, A_3$ ), то звук фокусируется очень слабо или совсем не фокусируется. При значительно меньшей длине волны из устья исходит узкий пучок плоских волн.

Это значит, что для получения желаемого действия размеры рупора должны в несколько раз превышать длину волны. Какой отсюда можно сделать вывод о частотах звука хлопущки, предназначенной для создания эхо?

Предположим, что мы решили использовать 256 звуковых волн в секунду. При скорости звука в воздухе  $344 \text{ м/сек}$  длина волны такого звука равна  $344/256$ , т. е. около  $1,3 \text{ м}$ . Требуемые размеры рупора должны в несколько раз пре-

вышать длину волны. Следовательно, если бы даже он был изготовлен из самого легкого материала, он оказался бы слишком громоздким. Ясно, что необходимо выбирать более короткие волны, т. е. более высокие частоты. Но выше порога слышимости, т. е. выше частот 15 000—20 000 *гц*, идти нельзя. Хорошим компромиссом явится частота где-то в интервале от 5000 до 10 000 *гц*. Длина волны звука с частотой 10 000 *гц* равна  $344/10\,000$ , т. е. около 3 *см*. Изготовить рупор диаметром в несколько сантиметров нетрудно, и если бы мы руководствовались только этим соображением, то следовало бы выбирать самые высокие из хорошо слышимых частот и, соответственно, самые короткие волны. Летучие мыши пользуются частотами до 130 000 *гц*, что соответствует длине волны около 2,5 *мм*, и их крошечные рты и уши очень эффективно концентрируют такие короткие звуковые волны. Хлопушки издают звуки, содержащие ряд частот или длин волн в каждом хлопке. Но для получения идеального хлопка, содержащего практически лишь одну частоту и в то же время достаточно короткого, чтобы можно было четко отделять эхо от исходного звука, необходимо иметь более сложные источники звука. Уже одно только требование четкой раздельности звучания эхо ограничивает выбор частоты звука. Для установления определенной частоты необходимо, чтобы за время своего существования звук содержал несколько волн, и если звук длится только одну миллисекунду, то при частоте 10 000 *гц* он будет содержать всего десять волн, а при частоте 5000 *гц* — пять волн.

В этих простых опытах с хлопучкой предлагалось действовать так, как если бы вы были лишены зрения, и выяснить, что удастся узнать об окружающих вас крупных предметах, пользуясь только эхо. Ниже я расскажу более подробно о том, как слепые поступают в действительности, каких успехов они достигли и что мешает им использовать эхолокацию для распознавания всех крупных препятствий, угрожающих безопасности их передвижения. Но прежде чем обратиться к непосредственному применению эхолокации к неотложной задаче, стоящей перед множеством людей, лишенных зрения, полезно будет рассмотреть некоторые физические свойства эхо, определяющие их интенсивность и слышимость. Здесь мы снова будем широко пользоваться как настоящими эхо, возбуждаемыми хлопучками, так и «эхо», наблюдаемыми в водяной ванне, столь удобной для анализа волнового движения в лабораторных условиях.

## Измерение скорости звука при помощи эхо

Для начала можно рассмотреть простой способ приближенного определения скорости звука по времени прихода эхо от удаленного холма. Если расстояние до холма не известно, время же пробега звука и его эхо составляет несколько секунд, то, измерив это время по хорошему секундомеру (позволяющему отсчитывать десятые доли секунды), мы найдем неизвестное расстояние, если только мы знаем скорость звука. Или, наоборот, зная расстояние, мы можем использовать измерение времени пробега для определения скорости звуковых волн. Если точность измерения времени задается секундомером и равна 0,1 секунды, то ошибка в определении расстояния будет равна пути, который звук пробежит за это время, т. е. 34 м. Но это относится к полной длине пути туда и обратно; значит, теоретически говоря, мы можем определить расстояние до холма с точностью до  $\pm 17$  м. Другой источник ошибок — это «время реакции» наблюдателя, т. е. промежуток времени между фактическим приходом эхо и нажатием кнопки секундомера. Хотя эта ошибка составляет заметную долю секунды и уж наверное превосходит 0,1 секунды, вряд ли есть заметная разница между временем запаздывания при пуске секундомера после прихода исходного звука и временем запаздывания при остановке секундомера после прихода эхо; следовательно, ошибки почти полностью взаимно уничтожаются. Еще одна ошибка появится в тех случаях, когда исходный звук и эхо нарастают постепенно. Может случиться, что нарастание до максимума длится полсекунды, интенсивность же эхо настолько мала, что мы слышим только его максимум. В этом случае мы в первый раз нажмем кнопку спустя «время реакции» после момента прихода исходного звука, а второй раз — с таким же запаздыванием, но только после того, как эхо почти достигло своего максимума. Это легко может дать ошибку порядка 0,3 секунды, если только для эксперимента не выбраны очень резкие звуки.

Аналогичный опыт можно провести при помощи хлопущки, если нам удастся повторять хлопки достаточно быстро один за другим. Предположим, что вы стоите в 30 метрах от большого здания и направляете на него хлопущку таким образом, что слышно отчетливое эхо. Так как звук пробегает от своего источника до здания и обратно до уха

60 м, то на этот путь ему потребуется 60/344, т. е. примерно 0,17 секунды. Если давать хлопки по два раза в одну секунду, то, отсчитывая время от первого хлопкa как от нуля, вы услышите эхо через 0,17 секунды, второй хлопок — через 0,50 секунды, второе эхо — через 0,67 секунды, и т. д. Если ускорить следование хлопков друг за другом так, чтобы второй хлопок возник через 0,17 секунды после первого, то он замаскирует эхо от первого хлопкa. При достаточно регулярном следовании хлопков слияние эхо со следующим хлопком дает новый способ определения расстояния, — если скорость звука известна.

Темп работы хлопущки можно задавать точнее, если пользоваться механическим устройством, например метрономом. Но при известном навыке можно добиться достаточной правильности и без этого. Некоторое практическое затруднение возникает ввиду того, что звук, издаваемый хлопущкой при сгибании стальной полоски, обычно немного громче и имеет несколько другой тембр, чем при ее разгибании. Таким образом, последовательные щелчки различаются по уровню и тембру, и не всегда легко поддерживать ровный ритм. Но этого все же можно добиться; кроме того, независимо от его практической осуществимости, полезно уяснить себе этот простой метод нахождения расстояния путем определения частоты повторения хлопков, дающей слияние каждого эхо с последующим хлопком. Хороший способ определения критической частоты повторения хлопков — счет вторым участником опыта числа хлопков за интервал времени в 5 или 10 секунд, отсчитываемый по секундомеру или секундной стрелке обыкновенных часов.

Можно воспользоваться этой же хлопущкой, чтобы убедительно показать концентрацию эхо в определенных направлениях при отражении от поверхностей различных размеров по отношению к длине волны звука хлопкa. Диапазон частот для большинства хлопущек лежит в пределах от 3 до 10 килогерц, так что длина волны самых интенсивных звуков равна нескольким сантиметрам. Для таких длин волн отражение от здания происходит почти так же, как отражение световых волн от зеркала. Когда хлопущка направлена прямо на стену здания, то эхо возвращается обратно в том же направлении; когда же издаваемый хлопущкой звук падает на стену под косым углом, то, как показано на рис. 9, эхо направится в сторону от хлопущки. Поэтому так легко обнаружить здание, просматривая пространство

при помощи хлопушки: когда рупор направлен прямо на стену, эхо звучит громче всего.

Следующий простой опыт, требующий участия двух лиц, демонстрирует поведение этих эхо, отражающихся от стены здания. Один из участников направляет хлопушку под углом  $20\text{--}30^\circ$  к стене по одну сторону перпендикуляра, опущенного из хлопушки на стену, а второй слушает эхо. Находясь в

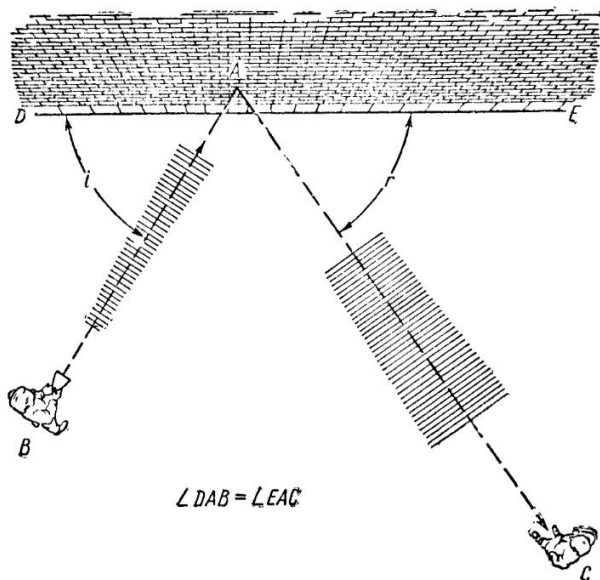


Рис. 9. Возвращение звука от большой плоской поверхности подчиняется закону отражения. При проведении опыта отмечайте взаимное расположение обоих экспериментаторов.

точке *B* рядом с хлопушкой, он услышит эхо не так ясно, как в точке *C*, лежащей сбоку и несколько позади нее. Положение наибольшей громкости можно предсказать на основании закона зеркального отражения света, а именно: угол отражения  $r$  (угол  $EAC$ ) равен углу падения  $i$  (угол  $DAB$ ). Результаты получатся более четкими, если слушатель будет стоять позади хлопушки таким образом, чтобы его уши были защищены рупором от исходных хлопков. Точность наблюдений можно повысить, если установить

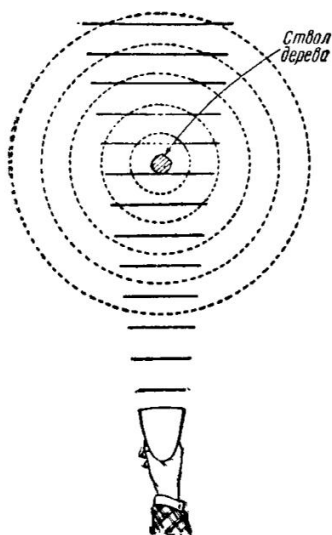
хлопушку на треножник от фотоаппарата и медленно поворачивать ее под разными углами к стенке. Слушатель может либо двигаться взад и вперед, отмечая точки, в которых эхо слышно яснее всего, либо стоять неподвижно в тех или иных точках, в то время как первый экспериментатор будет медленно поворачивать хлопушку туда и обратно, направо и налево, согласно инструкциям наблюдателя. Поразительно, насколько точно такие опыты подтверждают правильность закона о равенстве угла отражения углу падения.

Вот пример совсем иных обстоятельств, когда легко наблюдается простой тип эхолокации. Если, проезжая в автомобиле, открыть окно, то будет слышен целый ряд звуков: шумы мотора, шин, воздуха, проносящегося мимо окон. Когда машина проезжает рядом с высокой каменной стеной, или через туннель, или близко от какой бы то ни было поверхности больших размеров, то тембр всех этих звуков изменяется. Цепочку бетонных столбов железнодорожной ограды, каменные столбы, поддерживающие железную решетку, и даже ряд столбов деревянного забора можно обнаружить по быстрому следованию ряда свистящих звуков, слышных при движении автомашины мимо них. Проезжая по знакомой дороге, попробуйте прислушаться, закрыв глаза; вы будете удивлены, как много мест вы узнаете на слух. Если вы обнаружили ряд ясно «слышимых» столбов ограды, сравните вызванный ими звуковой эффект с тем, который вы слышите, когда проезжаете по туннелю. Когда вы едете вдоль ограды, то слышны в основном звуки высокой частоты, возвращающиеся как эхо от сравнительно малых поверхностей. В туннеле же большая поверхность стен отразит почти весь набор звуков, издаваемых автомашиной. Если вы будете тщательно следить за этими звуками, в то время как машина движется примерно с постоянной скоростью, то увидите, что можно научиться различать на слух многие типы препятствий, в том числе и стоящие автомашины, по эхо от них, добавляющимся к примерно постоянным звукам вашей собственной машины.

Летучие мыши и люди пользуются эхо для обнаружения меньших и труднее уловимых объектов, чем стены зданий, и как только мы обращаемся к малым предметам, становятся важными некоторые интересные свойства отраженных волн. Приобретя некоторый навык работы с хлопушкой, интересно испробовать ее на деревьях, телефонных столбах и других объектах, которые легко найти на открытом воздухе вдали



от других отражающих предметов. При навыке и внимании можно научиться обнаруживать деревья диаметром в 6 дюймов с расстояния в несколько футов, а когда вы этого добьетесь, вы снова можете попросить кого-нибудь направить хлопущку на дерево, в то время как вы — слушающий наблюдатель — будете переходить с места на место, разыскивая



положение, где эхо звучит громче всего. В этом случае обычно можно обнаружить, что эхо будет слышно в значительно большем диапазоне углов, чем громкое эхо от здания. Это объясняется тем, что диаметр дерева лишь немного превышает одну длину волны, и поэтому, как показано на рис. 10, эхо распространяется во много большем диапазоне направлений. По той же причине, по которой рупор с размерами меньше одной длины волны не может сконцентрировать звук, эхо от малых объектов рассеивается во все стороны. Если вам удастся услышать эхо от деревьев или столбов диаметром в одну или две длины волны, то вы обнаружите, что они почти одинаково громки под самыми разными углами. Но, конечно, ни под каким углом не получится такое громкое эхо, как от больших объектов, например от здания. Та же закономерность справедлива и для световых волн и для поверхно-

Рис. 10. Когда длина волны звука больше размеров отражающего тела (здесь — ствола дерева), то эхо (рассеянный звук) распространяется по всем направлениям. Сплошными линиями показан исходный звук, пунктиром — эхо. Толщина черточек дает интенсивность эхо.

стных волн на воде; выполнив опыты в водяной ванне, вы увидите, что длинные объекты дают зеркальное отражение поверхностных волн а предметы с размерами порядка одной длины волны рассеивают их во все стороны.

Различие между зеркальным отражением и рассеянием волн можно изучать в демонстрационной водяной ванне или даже в ванне для купанья, хотя в ней поверхностные волны видны не так ясно. Подобно тому как эхо от коротких зву-

ков слышны лучше, чем от длинных, эхо для поверхностных волн легче наблюдать, возбуждая короткие цуги (импульсы). Вероятно именно поэтому водяные жуки так часто прерывают свои плавательные движения — для образования интервалов затишья, во время которых легче ощутить волны, отраженные от предметов, находящихся на поверхности воды в некотором отдалении. Если легким ударом о воду возбудить короткий цуг поверхностных волн, то нетрудно увидеть их отражение от края демонстрационной ванны или даже ванны для купанья. Если опустить в воду предмет с размерами порядка одной длины волны (например, короткий кусок деревянной палки или деревянную пробку) так, чтобы его ось была перпендикулярна к поверхности воды, то, присмотревшись внимательно, можно увидеть слабые волны, рассеиваемые почти по всем направлениям от этого источника поверхностных эхо. Само собой разумеется, что всякие другие мешающие волны должны отсутствовать, но коль скоро это явление удалось наблюдать, интересно переходить от одного размера цилиндрического объекта к другому, начиная от наименьших размеров, при которых эхо еще удастся заметить, и кончая большими объектами, на много превышающими по размерам длину волны.

Эти опыты убедительно демонстрируют существенное различие между остро направленным зеркальным отражением и всесторонним рассеянием от малых источников эхо. Ниже мы увидим, какое важное значение приобретут эти два главных типа отражений, когда мы перейдем от рассмотрения физической стороны эхо к практическому использованию эхо человеком, а также летучими мышами и другими животными, выработавшими столь тонкие и точные методы эхолокации для повседневного применения.

---

## ГЛАВА 4

### ЯЗЫК ЭХО

Из нашего краткого обзора замечательных навигаторских подвигов некоторых животных выяснилась роль звука, как самого важного для них носителя сведений. Это привело нас к подробному изучению звуков как самих по себе, так и особенно их отражений и эхо; наша цель — достичь более сознательной и умелой постановки опытов, которые позволили бы нам выяснить, как именно животные пользуются эхо: каковы ограничения этого способа, что именно помогает, что мешает, какие физические характеристики наиболее благоприятны для эхолокации и каковы специальные характеристики звуков, издаваемых этими животными. Мы надеемся обнаружить новые факты, быть может, неясные вначале, которые окажутся полезными бредущему слепцу; но если даже это и не удастся, мы, несомненно, обогатим наши знания о том, что нас окружает. Люди всегда многому учились у животных, и даже теперь, в век электроники и атомной энергии, нам еще многому нужно научиться. Так как летучие мыши столь опытны по части использования эхо, начнем с более подробного изучения звуков, издаваемых ими для получения эхо, которым они руководствуются при управлении своим проворным полетом.

#### Сигналы ориентировки у летучих мышей

Летучие мыши издают разнообразные звуки голосом; например, если их потревожить, то они начинают пищать и стрекотать. Но нас интересуют главным образом звуки, применяемые ими в полете для создания полезных эхо, сообщающих им об удаленных объектах. Все эти *сигналы ориентировки* имеют высокие частоты; упомянутое нами слабое

слышимое тиканье создается той малой частью этих звуков, которая попадает в диапазон слышимых нами частот. Главная же часть звуковой энергии, излучаемой летящей летучей мышью, лежит на частотах от 10 до 150 килогерц, в зависимости от вида животного. Я опишу только один-два примера таких звуков ориентировки, для которых были проведены измерения у нескольких типичных представителей летучих мышей.

*Подковоносы*, принадлежащие к группе насекомоядных летучих мышей, пользуются звуковыми сигналами простейшей формы; эти зверьки встречаются в Европе, Азии, Австралии и Африке. Они применяют в качестве сигналов ориентировки почти чистые тоны любой частоты в пределах от 60 до 120 килогерц, в зависимости от вида животного. Длительность отдельных звуков составляет малую долю секунды, обычно от 50 до 100 миллисекунд, но это все же гораздо больше длительности звуков, издаваемых другими летучими мышами. Название «подковоносы» возникло из-за сложной системы складок или мембран, окружающих их ноздри и рот двумя примерно концентрическими розетками, смутно напоминающими подкову, если смотреть на них спереди. Как было показано недавно немецким зоологом Францем Мэресом, эта подкова играет роль маленького рупора, концентрирующего издаваемый летучей мышью звук в узкий пучок, который бежит из стороны в сторону, когда летучая мышь просматривает с его помощью окружающее пространство. Летучие мыши в покое обычно подвешиваются задними лапками и висят вниз головой; у подковоносов тазобедренные суставы отличаются особой гибкостью, благодаря чему они могут поворачиваться почти на полную окружность и при помощи своего высокочастотного звукового пучка прощупывать все окружающее их пространство. Они часто срываются с места из этого положения и схватывают насекомое, пролетающее в пределах их досягаемости.

Летучие мыши другой группы, обитающие только в тропиках, питаются главным образом плодами, но некоторые из них едят также и насекомых, которых они находят на растениях. Звуки, издаваемые этими летучими мышами, гораздо слабее, чем у подковоносов, и представляют собой чрезвычайно короткие щелчки длительностью от доли миллисекунды до 2—3 миллисекунд. Форма волны этих очень коротких импульсов сложна, а частоты их для разных видов варьируют в пределах от 10 до 150 килогерц. К этой

группе принадлежат летучие мыши-вампиры. Они питаются кровью живых животных и людей. Не нарушая сна своей жертвы, они своими острыми зубами делают небольшие надрезы и пьют вытекающую кровь, пока она не свернется.

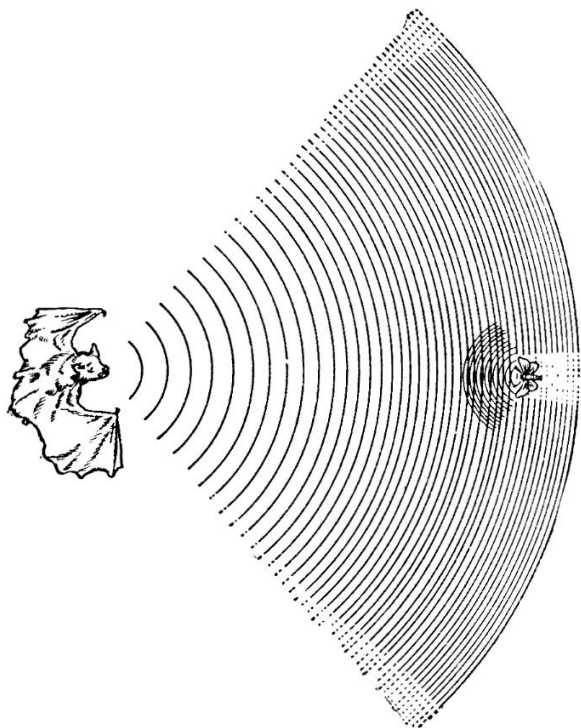


Рис. 11. Частота и длина волны звука, издаваемого летучей мышью, изменяется в пределах отдельного сигнала. Рисунок построен примерно в масштабе и дает представление о малости отражения от насекомого.

Эти летучие мыши, по-видимому, не ведут активного преследования летающих насекомых, и интенсивность издаваемых ими звуков так мала, что их удастся зарегистрировать только при помощи самой чувствительной аппаратуры. В отличие от двух других групп, этих летучих мышей можно назвать *шепчущими летучими мышами*.

Третью большую категорию составляют обыкновенные насекомоядные летучие мыши, хорошо известные в Северной

Америке и Европе. За очень небольшими исключениями эти летучие мыши охотятся за насекомыми на открытом воздухе, гоняясь за своей ускользящей добычей и ловя ее на лету, маневрируя, проделывая мгновенные повороты и другие акробатические трюки в воздухе при своем преследовании и перехватывании порхающих в неправильном полете мелких ночных бабочек, летающих жуков, поденок и комаров.

Сигналы этих летучих мышей почти той же интенсивности, что и у подковоносов, длятся всего по несколько миллисекунд и отличаются характерной частотной структурой. Каждый сигнал начинается с очень высокой частоты, которая за краткое время его звучания падает почти на целую октаву. Обыкновенные малые рыжие летучие мыши (ночницы) начинают каждый сигнал с частоты 90 килогерц и заканчивают его на частоте 45 килогерц. Так как каждый сигнал длится всего около 2 миллисекунд, то изменение частоты оказывается чрезвычайно быстрым. Действительно, за 2 миллисекунды звук пробегает двойной диапазон слышимых человеком частот, считая по числу периодов в секунду. Как показано на рис. 11, типичный сигнал ориентировки содержит всего лишь около 50 звуковых волн, среди которых не найдется и двух совершенно одинаковых. Длина начальных волн составляет всего лишь половину длины волны в конце сигнала. Это — *чирикание*; по крайней мере так называют издаваемые некоторыми насекомыми слышимые звуки, которые пробегают такой же широкий диапазон частот за малую долю секунды. Такой звук часто называют частотно-модулированным звуковым импульсом, и поэтому об этой группе животных можно говорить как о *частотно-модулирующих летучих мышах*, в отличие от подковоносов с их значительно более длительными, собранными в узкий пучок сигналами почти неизменной частоты, и от тропических «шепчущих летучих мышей» с их слабыми, но сложными сигналами.

### Эхо от преследуемых насекомых

«Частотно-модулирующие» летучие мыши были исследованы значительно подробнее, чем две другие группы; поэтому о них многое известно. Они чрезвычайно хорошо приспособлены для жизни в полете и очень искусно маневрируют в самых трудных условиях. Их ежедневное (или, вернее, еженощное) занятие состоит в охоте за летающими насекомыми, составляющими их пищу, что требует от них мастерства в

обнаружении малых движущихся объектов и в воздушной акробатике, необходимой для поимки добычи. Так как летучие мыши охотятся почти исключительно в темные ночи, часто настигая добычу сверху, или в древесных зарослях, где насекомые проектируются на темный фон, ясно, что визуальное обнаружение невозможно. А кроме того, как сказано в главе I, Спалланцани показал еще до 1800 г., что летучие мыши, лишенные зрения, ловят столько же насекомых, сколько и нормальные животные.

До сих пор обычно считали, что летучие мыши обнаруживают насекомых по звуку ударов их крыльев, и это, вероятно, действительно происходит в некоторых случаях, когда насекомые в полете издают заметное жужжание или гуденье. Но несколько лет назад я обнаружил, что частота повторений сигналов ориентировки (высокочастотных чириканий) сильно растет, когда летучая мышь обнаруживает и догоняет летящее насекомое. Больше того, летучие мыши часто принимаются преследовать поддельное насекомое в виде камешка или комочка смоченной ваты, подброшенных в воздух, когда они пролетают рядом. Они, конечно, не кусают и не глотают такую приманку, но они жадно устремляются к ней, повышая частоту испускания сигналов, используемых ими при охоте в нормальных условиях за живыми насекомыми. Если дать себе отчет, в какой степени беззвучны многие из мелких насекомых, которыми питаются летучие мыши, то становится правдоподобным, хотя еще и не строго доказанным, что летучие мыши обнаруживают по крайней мере некоторых из преследуемых насекомых по отражениям своих сигналов ориентировки, а не только по звукам, издаваемым самими насекомыми.

Ниже я еще вернусь к вопросу о картине излучения сигналов ориентировки в различных условиях, включая преследование насекомого. Но прежде всего рассмотрим эффективность самого процесса охоты за насекомыми. Сколько насекомых ловит летучая мышь за данный промежуток времени? Как велики пойманные ею насекомые? На каком расстоянии она их обнаруживает? Лишь совсем недавно удалось дать хотя бы частичные предварительные ответы на эти вопросы. Спалланцани и другие ученые, исследовавшие содержимое желудков летучих мышей, вернувшихся после удачной ночной охоты, были поражены относительно большой массой тонко пережеванных остатков насекомых в пищеварительном тракте каждой мыши.

Одно из исследований показало, что малая летучая мышь весом 7 г обычно успевает наловить за один час активной охоты 1 г насекомых. В самое последнее время нам удалось заставить нескольких летучих мышей охотиться за насекомыми в лабораторном летном помещении, где можно было изучать и фотографировать процесс охоты. Одна еще более мелкая летучая мышь, весившая всего 3,5 г, на наших глазах ловила комаров в таком быстром темпе, что за 15 минут охоты увеличила свой вес на 10%, доведя его до 3,85 г. Комары весили примерно по 0,002 г каждый. За 15 минут охоты, происходившей под тщательным нашим наблюдением, летучая мышь могла прибавить в весе только за счет пойманных ею комаров. Она больше ничего не ела и не пила. Она, вероятно, даже потеряла немного в весе вследствие испарения воды при дыхании. Следовательно, пойманные ею комары весили больше 0,35 г. Разделив прибавку в весе на вес одного комара, найдем, что за 15 минут было поймано по крайней мере 175 комаров (т. е. больше чем один комар за каждые 6 секунд). За этот сеанс охоты мы насчитали примерно столько же отдельных явно различимых маневров преследования.

Есть все основания считать, что подобный темп ловли насекомых типичен для ночной охоты миллионов таких и родственных им летучих мышей во всем мире. Разумеется, они не всегда ловят одних комаров; их вполне удовлетворяет почти любое доступное в данной местности и не слишком крупное насекомое. Иногда они ловят ночных бабочек с размахом крыльев, достигающим до 1 дюйма, но иногда — насекомых по размерам меньше комаров. В одном случае во рту летучей мыши, убитой во время охоты, была обнаружена еще не проглоченная мошка весом всего лишь в 0,0002 г.

Маневрирование, позволяющее ловить по одному насекомому каждые 6 секунд, и делает полет летучей мыши столь неправильным. О летучих мышах никак нельзя сказать, что они — слабые летуны, уносимые воздушными потоками; они — искусные летчики, выполняющие трудную работу перехватывания летящих насекомых. Процент успешных результатов у них должен быть очень высок. Успешность ловли у них, конечно, неизмеримо выше, чем если бы они просто летали с открытым ртом. Даже при особом изобилии комаров летучая мышь должна была бы без всякого перерыва летать всю ночь с открытым ртом, пока просто по закону случая ей не попал бы в рот один-единственный комар.



В действительности же она ловит по одному насекомому каждые несколько секунд.

Фотографии летучей мыши, преследующей москита, показывают, что маневр начинается иногда на расстоянии 2—3 футов от насекомого. Частота следования сигналов изменяется за долю секунды до того, как она поворачивается в сторону своей жертвы. Мы пойдем значение этих наблюдений, когда разъясним, как летучая мышь выбирает темпы повторения частотно-модулированных сигналов в зависимости от типа полета. Когда малая рыжая летучая мышь летит примерно по прямой и не слишком близко от непосредственно интересующих ее объектов, она издает в секунду 10—20 чириканий длительностью по 1—2 миллисекунды каждое. Однако, как только она приближается к небольшим препятствиям, например к проволокам, натянутым в лабораторном помещении для испытания ее летного мастерства, число сигналов за данный промежуток времени значительно возрастает. В течение короткого периода времени она может издавать до 250 сигналов в секунду. В этих случаях отдельные сигналы укорачиваются, становясь обычно короче 1 миллисекунды, так что между соседними сигналами все же сохраняются промежутки тишины.

При изучении высокочастотных сигналов летучих мышей в естественных условиях различие между прямым равномерным полетом и активным преследованием летящих насекомых делается очевидным. Такое подслушивание, разумеется, возможно только при наличии аппаратуры, способной обнаруживать неслышимые звуки, издаваемые летучими мышами. В одном из удобных типов аппаратуры каждый высокочастотный звук, издаваемый летучей мышью, «переводится» в слышимый щелчок в телефоне или маленьком громкоговорителе. Это позволяет одновременно наблюдать за летучей мышью и «слушать» сигналы ориентации в таком транспонированном виде. При этом преобразовании пропадает большая часть деталей, в том числе охватывающая целую октаву частотная модуляция звука, но каждый раз, когда летучая мышь издает свое высокочастотное чириканье, мы слышим щелчок в громкоговорителе.

Если воспользоваться этим «подслушивающим» аппаратом в каком-нибудь месте, где летучие мыши охотятся за насекомыми, мы заметим, что когда одна из них легит мимо нас по прямому курсу на высоте нескольких футов над землей, в громкоговорителе слышна медленная последовательность

звуков «путт-путт-путт-путт», как от старого ленивого газолинового мотора. Часто мышь пролетает мимо по прямому курсу, почти или даже совсем не меняя этого ритма, однако если ее внимание привлечено насекомым или приманкой в виде подброшенного вверх камешка, частота повторения сигналов ориентировки заметно возрастает. Иногда частота повторения возрастает лишь незначительно, но если преследование добычи идет всерьез и требует резких маневров, вроде внезапных поворотов, переворачивания через крыло и крутого пикирования, то преобразованные звуки следуют друг за другом как выхлопы разгоняющегося мотоциклетного мотора.

Случается, что частота повторений нарастает настолько и отдельные сигналы следуют так близко друг за другом, что для человеческого уха они сливаются в жалобное жужжание, напоминающее звук цепной пилы. Такие нарастания происходят как раз во время сближения с ускользающей движущейся целью,— сильный довод против предположения, что летучие мыши обнаруживают и преследуют насекомых только по звуку взмахов их крыльев. Действительно, в этом случае следовало бы ожидать, что вблизи от насекомого летучая мышь соблюдала бы относительную тишину для того, чтобы лучше слышать слабое жужжание его крыльев. Вместо этого она наполняет воздух чрезвычайно быстрыми сериями сигналов, которые могли бы создавать серьезные помехи пассивному слушанию.

### Точность эхолокации

О быстроте и точности управления полетом у летучих мышей при помощи эхо можно судить по минимальным размерам обнаруживаемых ими объектов и по максимальным расстояниям обнаружения. В тех опытах, которые до сих пор удавалось осуществить, вместо малых изолированных объектов (насекомые, камешки) использовались проволочные или веревочные препятствия. Дело просто в том, что было бы слишком сложно удерживать в воздухе неподвижными отдельные предметы достаточно долго, чтобы осуществить точную проверку способности летучих мышей обходить препятствия. С другой стороны, если поперек лабораторного помещения натянуть ряд проволок, как это показано на рис. 12, то животные стремятся избежать столкновений с ними, хотя, например, рыжая летучая мышь весит так мало, что

даже случайный прямой удар о натянутую проволоку не вызывает у нее, по-видимому, никаких повреждений.

При расстояниях между проволоками в 30 см, т. е. немного более, чем размах крыльев малой рыжей летучей мыши, такая решетка представляет трудно преодолимый барьер, и даже самые искусные из испытуемых животных время от времени слегка задевают за них. Уменьшение диаметра проволок до доли миллиметра не влияет заметным образом на процент удачных полетов наиболее умелых особей. Конечно, многие из животных при первых попытках обхода

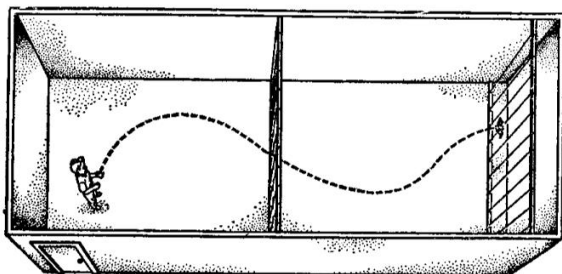


Рис 12. Навигаторское искусство летучих мышей проверялось в этом помещении длиной 10 м и шириной 3 м. Один ряд проволок протягивали посреди помещения, другой — на расстоянии 45 см от стены.

таких препятствий выглядят неуклюжими и натываются даже на толстые проволоки, но это обычно связано с их плохим физическим состоянием или неполным пробуждением от глубокого сна, в который они легко впадают даже в летние дни. В нормальном состоянии малая летучая мышь только тогда не может обойти препятствие и начинает натекаться на проволоки чисто случайно, когда диаметр проволоки уменьшен до 0,07 мм (примерно толщина человеческого волоса). Среди наших подопытных животных попадались настоящие «чемпионы», которые удивительно часто ухитрялись избегать столкновений даже при небольшом увеличении диаметра проволок (до 0,12 мм) по сравнению с этим предельным размером.

Как ни удивительна способность летучих мышей обнаруживать проволоку диаметром 0,12 мм, описанные выше опыты не позволяют найти расстояние, на котором происходит это обнаружение. Только киносъемка летучей мыши с

записью на звуковой дорожке транспонированных сигналов ориентировки дает некоторые указания на дальность их локации. Тщательное изучение киноленты кадр за кадром позволило нам найти расстояние, на котором частота повторения сигналов впервые начинает возрастать. Это расстояние меняется от полета к полету даже у одного и того же животного. Ниже приводятся средние значения расстояний, полученные из многочисленных измерений, сделанных для проволок различных диаметров.

Диаметр проволоки (в миллиметрах)	Средняя частота повторения сигналов до приближения к проволокам (число сигналов в секунду)	Среднее значение максимальной частоты повторения сигналов (число сигналов в секунду)	Среднее расстояние, на котором впервые начинает возрастать частота повторения сигналов (в сантиметрах)
3,0	12	50	215
1,07	12	40	185
0,65	13	30	150
0,46	13	40	120
0,28	12	27	105
0,18	12	22	90

Эти расстояния значительно больше, чем можно было бы ожидать, судя только по поведению летучей мыши в полете. Обычно она летит по совершенно прямой линии и только на последних нескольких дюймах отклоняется в сторону, чтобы избежать столкновения с проволокой. Однако рост частоты повторения сигналов показывает, что она замечает проволоку и реагирует на нее еще на много больших расстояниях, которые и приведены в таблице. Если проволоки нет, то нет и никакого увеличения частоты повторения сигналов ориентировки. Возможно, конечно, что летучая мышь обнаруживает проволоку с еще большего расстояния, чем показано в таблице, однако она не проявляет это никаким способом, доступным нашему пониманию. Важно, что летучая мышь обнаруживает даже тонкую проволоку диаметром 0,18 мм не просто в последний момент, когда еще есть возможность избежать столкновения, а заблаговременно. Интересно также отметить, что проволока малого диаметра вызывает лишь малое увеличение частоты повторения сигналов. Летучая мышь летает с такой большой скоростью (приблизительно 4 м в секунду), что, заметив тонкую проволоку, она успевает издать всего два-три лишних сигнала

в дополнение к тем, которые она издала бы в отсутствие препятствия.

Все эти факты показывают, что эхолокация, применяемая летучими мышами,— это не грубые поиски ощупью, а изощренный и точный метод ориентировки.

### Хлеб насущный на водах

Список трудных задач, разрешаемых летучими мышами хотя бы частично при помощи эхолокации, далеко не исчерпывается приведенными выше примерами. Некоторые представители шепчущих летучих мышей ловят насекомых, мелких птиц и ящериц, сидящих на растениях, но нельзя быть уверенными, что это делается при помощи эхолокации. Возможно, что они просто прислушиваются к характерным зву-



Рис. 13. Рисунок выполнен по кинофильму, снятому с летучих мышей-рыболовов.

кам, издаваемым их жертвами. Более поразительно то, что представители четырех различных видов «частотно-модулирующих» летучих мышей добывают себе пропитание рыбной ловлей. Они летают непосредственно над поверхностью воды и время от времени окунают свои задние лапки в воду. Когти задних лапок у них длинные, острые и загнутые, и летучие мыши зацепляют ими мелкую рыбешку (рис. 13); каждый вечер они умудряются наловить этим способом рыбу в количестве, достаточном для насыщения. Ловя этим способом рыбу в темные ночи (иногда при подымающемся от воды тумане), эти животные издают ряд быстро повторяющихся сигналов, очень похожих на сигналы их насекомоядных родичей.

Расхождение между двумя способами добывания пищи не так велико, как может показаться на первый взгляд, так как насекомоядные летучие мыши утоляют жажду, скользя над поверхностью воды и погружая мордочку лишь настолько,

чтобы за один раз в рот попала лишь одна капля. Это требует от летучей мыши очень точного управления своими движениями, так как при погружении на лишней миллиметр она вся может очутиться в воде. Эти насекомоядные летучие мыши ловят также насекомых, сидящих на поверхности воды, так что для перехода к ловле рыбы под водой им пришлось сделать лишь маленький шаг. Так или иначе, но летучие мыши, ловящие рыбу, добывают этим способом почти все свое пропитание; однако во время последнего эволюционного этапа их развития они приобрели лишь сравнительно незначительное анатомическое изменение — специальные когти для поимки рыбы.

Когда я наблюдал в Панаме этих летучих мышей, я никогда не замечал, чтобы рыба вызывала какое-либо движение или возмущение водной поверхности. Часто вода бывала зеркально гладкой и летучая мышь пролетала сотни футов на высоте в несколько дюймов над поверхностью, быстро окуная свои задние лапки в воду на коротком участке полета и затем поднимая их и продолжая свой разведывательный бредущий полет. Откуда летучие мыши знают, где именно можно поймать рыбу? Они, очевидно, разборчивые рыболовы, потому что часто покрывают большие расстояния над самой водой, лишь изредка погружая свои когти под поверхность. Ловля рыбы происходит в темные и туманные ночи, так что мало вероятно, чтобы летучая мышь могла видеть рыбу; еще сомнительнее, чтобы рыба издавала звуки, воспринимаемые летучей мышью при полете в воздухе над поверхностью воды. Возможно ли, чтобы летучая мышь-рыболов воспринимала из-под воды эхо от рыбы? На первый взгляд может показаться, что это — лишь небольшое изменение методики ловли насекомых в воздухе родственными видами летучих мышей. Но резкое различие физических свойств воздуха и воды затрудняет передачу звука через границу, и поэтому использование эхолокации кажется здесь маловероятным объяснением.

В самом деле, мы уже говорили в связи с вопросом о подводном слухе у рыб и дельфинов, что звуковые волны лишь с большим трудом переходят из воздуха в воду или в обратном направлении. При падении звука под прямым углом из воздуха на поверхность воды лишь 0,12% его энергии переходит через поверхность в виде подводных звуковых волн. Такая же малая доля энергии волн, падающих на поверхность раздела из воды, переходит в воздух. Это значит, что

сигналы, издаваемые летучей мышью, падая на поверхность воды, отразившись от рыбы и снова выходя в воздух, должны ослабиться до значения  $(0,0012)^2 = 1,44 \cdot 10^{-6}$  от исходной силы звука вследствие двукратного перехода через границу раздела вода — воздух. Помимо этого огромного уменьшения есть еще и другие потери: лишь малая доля звука отразится от рыбы и лишь малая доля звуковой энергии, вернувшейся обратно в воздух, попадет в уши летучей мыши. Если судить по этим цифрам, возможность обнаружения летучей мышью рыбы под водой по звуковому эхо от нее представляется почти безнадежной; однако прежде чем целиком отказаться от этой идеи, как абсолютно неосуществимой, сравним предположенную возможность эхолокации рыб с заведомо известными достижениями насекомыхных летучих мышей в воздухе.

Некоторые виды «частотно-модулирующих» летучих мышей способны обнаруживать камешек или летающее насекомое с поперечником в 1 см с расстояния около 200 см. На расстояниях, превышающих 10 см, считая от рта летучей мыши, интенсивность звуков падает обратно пропорционально квадрату расстояния. Насекомое размером в 1 см — малая цель, и она рассеивает звук так, как излучает точечный источник, — интенсивность эхо от насекомого тоже будет обратно пропорциональна квадрату расстояния. Таким образом, с увеличением расстояния между летучей мышью и насекомым интенсивность эхо, достигающего ее ушей, убывает обратно пропорционально четвертой степени расстояния. При удвоении расстояния до насекомого интенсивность эхо упадет до  $(\frac{1}{2})^4 = \frac{1}{16}$  исходной величины. Предположим для определенности, что летучей мыши-рыболову удастся обнаружить небольшую рыбку с расстояния 10 см. Поскольку ткани тела рыбы по акустическим свойствам подобны воде, следует ожидать возникновения эхо только от плавательного пузыря рыбы. Этот пузырь — полость, заполненная воздухом, — имеется у большинства малых пресноводных рыб и размеры его составляют около 1 см, что близко к размерам насекомых, обнаруживаемых в воздухе с расстояния около 200 см. При всех прочих равных условиях интенсивность эхо при расстоянии до цели в 10 см будет больше, чем при расстоянии 200 см, в отношении  $(200/10)^4 = 1,6 \cdot 10^5$ . Два перехода через поверхность воды уменьшают эхо от рыбы в отношении  $1,44 \cdot 10^{-6}$ . Перемножая эти оба числа, получаем 0,23, откуда следует, что интенсивность эхо,

получаемого летучей мышью-рыболовом в этих гипотетических условиях, составит примерно  $\frac{1}{4}$  интенсивности эхо, фактически воспринимаемого летучей мышью, которая ловит насекомых в воздухе.

Если проведенное нами сравнение можно считать обоснованным, то возможность эхолокации рыбы начинает представляться совсем в ином свете, поскольку в коэффициенте порядка 4 безусловно нельзя быть уверенным при сделанных мною предположениях. Возможно, например, что насекомоядная летучая мышь обнаруживает насекомое размерами в 1 см на расстояниях, превышающих 200 см; тогда, при увеличении предельной дальности обнаружения до 280 см, интенсивность эхо от насекомого станет равной интенсивности гипотетического эхо от рыбы.

Этот числовой пример, однако, не может еще служить доказательством того, что летучие мыши-рыболовы действительно слышат эхо, доходящие до них от рыб через поверхность воды. Это просто означает, что такая возможность заслуживает внимания и не должна быть сразу отброшена под предлогом весьма больших потерь энергии при двух переходах через границу раздела воздух—вода. Иначе говоря, обнаружение насекомоядными летучими мышами насекомых в воздухе с расстояния 2 м означает, что они способны воспринимать примерно столь же слабые эхо, какие могли бы получиться при отражении от мелких рыбок, добываемых летучими мышами-рыболовами. В книге «Слушай в темноте» данная проблема рассмотрена более подробно. Но характерно, что гипотеза, представлявшаяся совершенно смехотворной, когда мы впервые узнали о потере энергии в миллион раз при переходе звука из воздуха в воду и обратно, оказывается при ближайшем рассмотрении вполне правдоподобным предположением. Здравый смысл и первое впечатление могут ввести в заблуждение, когда мы имеем дело с вопросами, лежащими вне области обычного человеческого опыта, на котором ведь как раз и построено то, что мы называем здравым смыслом.

### Борьба с глушением сигналов

До сих пор мы рассматривали эхо как более или менее изолированные звуки, которые можно рассматривать каждый в отдельности. Конечно, мы учитывали, что слабое эхо может оказаться замаскированным более сильным



исходным звуком. Опыты, описанные в гл. 3, показали, что если эхо следует через малую долю секунды после громкого резкого щелчка, то наш слух его не воспринимает. Летучие мыши, безусловно, умеют лучше нас отделять эти эхо от исходных звуков. Опыты Шевилла и Лоренс показали, что дельфин также может обнаружить эхо от маленькой рыбешки, несмотря на наличие мешающих громких эхо от дна пруда, поверхности воды и берегов, лежащих всего на несколько футов позади этой малой цели. Но мастерство летучих мышей превосходит все, о чем говорилось до сих пор. Гоняясь за насекомыми, они воспринимают более сложную смесь звуков, чем исходный сигнал и одиночное эхо от данного насекомого, имеющее ту же форму волны при уменьшенной энергии. В эту смесь входит целый ряд эхо от всех объектов, расположенных в радиусе нескольких футов,— от грунта, от других насекомых, от каждого куста, ветки, ствола дерева, от листка или травинки. Многие из этих объектов дают лишь слабые эхо, но ведь эхо от насекомого также имеет малую интенсивность, и если летучая мышь его слышит, то она должна воспринимать и все остальные эхо. Каким же образом летучая мышь отличает один вид слабых эхо от всех других? Как улавливает она разницу между эхо, обозначающим пищу, за которой нужно погнаться, и эхо, обозначающим препятствие, которого нужно избежать?

Если бы мы знали, каким образом летучие мыши так искусно отличают слабые эхо, приходящие от насекомых, от мешающих эхо, приходящих с разницей по времени в малую долю секунды, то мы могли бы быстрее двигаться к решению задачи об ориентировке слепых людей, не говоря уже о конструировании приборов, которые могли бы ближе подойти к достижениям летучих мышей. К сожалению, это пока еще невозможно, но интересно оценить способность летучих мышей к такому различению звуков. Даже для летучей мыши это — трудная задача, и слабое эхо от проволочных препятствий менее искусно используется ими, если в пределах малой доли секунды приходит другое, более сильное эхо.

Например, в одном из наших опытов мы протягивали поперек летного помещения два ряда проволок: один ряд посреди помещения, а второй — на расстоянии 45 см от стены (рис. 12, стр. 66). В обоих рядах проволоки тянулись от пола до потолка, а расстояние между соседними проволо-

ками составляло 30 см. При диаметре проволок 0,46 мм они представляли трудно обнаруживаемый отражатель эхо, но при большом числе полетов через средний ряд проволок летучим мышам удавалось избежать столкновений в среднем в 91% случаев. Если еще принять во внимание, что почти все столкновения были лишь легкими соприкосновениями кончиков крыльев с проволокой, вызванными не вполне своевременным взмахом крыла, следует признать это значительным успехом.

Когда те же животные не только пролетали сквозь среднее заграждение, но и продолжали свой полет дальше через крайний ряд, то успешность обхода препятствий ухудшалась и для ряда, расположенного на расстоянии 45 см от стены, составляла уже только 58%. Такой результат обусловлен, вероятно, гораздо более сильным эхо от стены. Для того чтобы разобраться в том, что здесь происходит, обратимся к рис. 14, где изображены графики звуков, достигающих ушей летучей мыши за малую долю секунды, считая от испускания исходного звука до прихода нескольких эхо. Верхний график *A* соответствует полету вблизи среднего ряда проволок, когда летучая мышь обнаруживает препятствие и избегает его. График *B* относится к проволокам того же диаметра, но расположенным на расстоянии 45 см от стены. График *C* относится к другому опыту, в котором диаметр проволок вблизи стены был увеличен до 1,07 мм. Для случая *C* летучая мышь избегала препятствия почти так же успешно, как и в случае проволок диаметром 0,46 мм, натянутых посреди помещения (*A*): доля удачных полетов составляла 88%. В естественных условиях летучая мышь будет следить за отражениями звука от насекомых, а не проволочек, а помехами будут эхо от грунта, стволов и веток деревьев. Они вызовут более сложные и более длительные эхо, чем стена летного помещения, но ни одна составляющая этого сложного эхо не достигнет силы одиночного отражения от большой стены. График *D* рис. 14 относится к подобному случаю, причем при его построении принималось, что некоторые из мешающих эхо приходили от объектов, расположенных ближе, чем преследуемое насекомое. Так будет, когда, как это часто случается, летучая мышь охотится среди густо растущих деревьев, где такие мешающие эхо маскируют важное для животного эхо от насекомого.

Уменьше летучих мышей ловить по насекомому через каждые несколько секунд свидетельствует об их способности

не только воспринимать эхо от насекомых, но и выделять их из мешанины других эхо, являющихся помехами. Этот процесс был изучен в лаборатории путем измерения эффективности эхолокации летучих мышей при стандартизированной

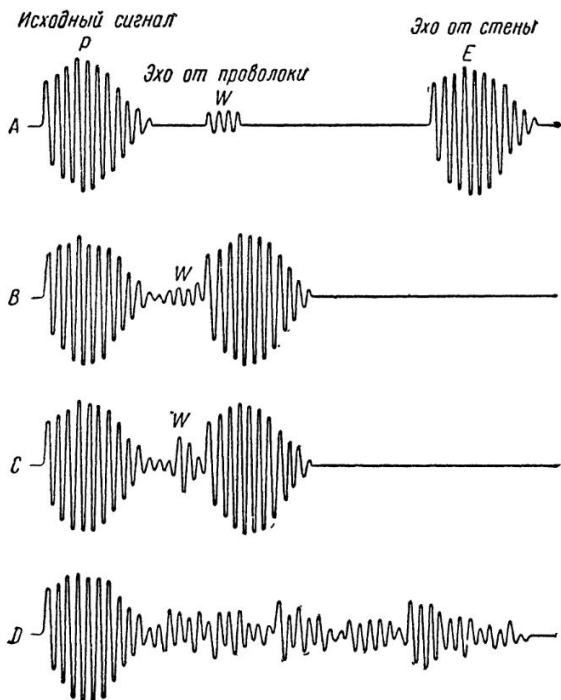


Рис. 14. Схематическое изображение сигнала летучей мыши и его эхо в летном помещении (см рис. 12) в различных условиях. А — при приближении к проволокам диаметром 0,46 мм, натянутым посреди помещения; В — при приближении к таким же проволокам, натянутым вблизи стены; С — при приближении к более толстым проволокам, натянутым вблизи стены (обратите внимание на более сильные эхо); Д — в лесу, в естественных условиях, в присутствии многих отражающих объектов, при приближении к насекомому. (Для упрощения частотная модуляция не показана.)

ванных условиях опыта. Вместо того, чтобы наблюдать летучих мышей в лесу во время охоты за насекомыми, мы создали в лабораторном летном помещении искусственные шумы, которые добавлялись к эхо от проволок, пола и стен.

Иначе говоря, мы пытались сбить с толку летучих мышей, «глуша» их сигналы. К нашему удивлению, из этого ничего не вышло, и эта неудача многое нам объяснила. Летучие мыши продолжали обходить препятствия из 1—2-миллиметровой проволоки даже при самом сильном шуме, какой мы только смогли создать: громком свисте, перекрывавшем весь частотный диапазон сигналов ориентировки. Искусные зверьки избегали этих проволочных препятствий при шуме значительно более громком, чем эхо, так же хорошо, как и в тишине. В принципе этот случай можно было бы изобразить в виде пятого графика на рис. 14, но правильное изображение шумов совершенно затемнило бы изображение эхо от проволочек.

Есть, однако, пределы способности распознавания даже у самой искусной летучей мыши. При постепенном уменьшении диаметра проволочек приходим к такому их размеру, когда летучая мышь уже перестает обнаруживать эхо от них. Минимальный обнаруживаемый размер при шуме больше, чем при тишине. Для одного из видов летучих мышей минимальный диаметр в тишине составлял около 0,25 мм, а при шуме возрастал до 0,5—0,7 мм, в зависимости от индивидуальных свойств данной особи и ее состояния во время опыта.

Из приведенных примеров ориентировки при помощи эхо ясно, что летучие мыши и дельфины весьма умело лоцируют малые удаленные объекты. Более того, они делают это с такой точностью и быстротой, которая может быть объяснена только тем, что для них это — единственный способ добывать себе пропитание. Если летучая мышь будет путаться в своих эхо, то она останется голодной. Голод — мощный побудитель к совершенствованию любого механизма или процесса, подверженного действию отбора. Биологи говорят здесь о *естественном отборе* — процессе, ответственном за эволюцию растений и животных, в результате которой образовались их разнообразные и сложные виды. Это медленный, но исключительно действенный процесс, и летучие мыши и дельфины дают нам примеры результатов, достигнутых благодаря естественному отбору, который на протяжении миллионов лет усовершенствовал способность этих животных использовать эхо. Наконец, необходимо также уяснить себе, что возможность использования эхо летучими мышами и дельфинами требовала не только средств для создания звуков, вызывающих эхо. Для этих животных

жизненно важно и умение отличать эхо, несущие необходимые сведения о пище, от смеси других, зачастую гораздо более громких звуков.

Не только летучим мышам и дельфинам удается отличать одну определенную часть сложного звука от других более громких компонент. Все животные, обладающие слухом, обладают и этой способностью различения, и во многих отношениях слух и мозг человека занимают здесь первое место. Когда мы слушаем речь или музыку, то мы отбираем для себя из сложной смеси непрерывно сменяющихся звуковых волн лишь малую существенную для нас часть. Слушая разговор, ведущийся на неизвестном языке, мы воспринимаем аналогичную толчею звуковых волн, но к ней у нас не оказывается ключа. Звуки шагов или писки мышей и их эхо — это тоже своеобразный язык. Он гораздо проще немецкого, китайского или английского, но человек, в частности слепой человек, находит, что ему трудно научиться. А в то же время летучие мыши, по размерам не превышающие новорожденного мышонка, достаточно хорошо его понимают, чтобы ловить в темноте по десять комаров за одну минуту. Что же особенное кроется в крошечном мозгу летучей мыши, позволяющее ей понимать этот язык и открывающее ей эту библиотеку полезных сведений? Пока еще никто не знает ответа. Мы не уверены даже, что правильно ставим вопросы.

---

## ГЛАВА 5

### СОНАР И РАДАР

Люди еще не выучились «языку эхо», но они достигли огромных успехов в конструировании эхолокационных приборов, которые во многих отношениях превосходят эхолокационные системы у животных, хотя в других отношениях и сильно им уступают. Что же представляют эти приборы, и как их сравнивать с аналогичными живыми механизмами в организмах летучих мышей, дельфинов и водяных жуков?

Звуки шагов и хлопушки простейшим образом помогают слепым создавать полезные для них эхо, но приемным устройством все же остается человеческое ухо. Быть может, когда-нибудь слепой человек выучится использовать возможности своего несравненного мозгового аппарата для лучшего понимания языка эхо. Но пока что нам важно дать оценку эффективности искусственных приборов, разработанных человеком для осуществления посылки и приема эхолокационных сигналов. Эти приборы были разработаны для чисто практических, зачастую военных целей, и они наиболее эффективны на больших расстояниях, для которых они и были предназначены. Устройства, использующие звуковые волны, называют системами *сонар*. Устройства, в которых используются электромагнитные волны, называются системами *радар*. Сонар применяется человеком почти исключительно для подводной эхолокации, а радары (радиолокаторы) — в воздухе и межпланетном пространстве.

#### Эхо под водой

Трагическая гибель «Титаника» при столкновении с айсбергом в 1912 г. вызвала первые попытки изобрести средство обнаружения айсбергов в темноте или в тумане. Но еще в 1959 г. пассажирское океанское судно, оборудо-

ванное всеми современными навигационными средствами, утонуло из-за столкновения с айсбергом. Плодовитый изобретатель Хайрем Мэксим, пытавшийся, между прочим, в конце XIX века построить летательную машину, предложил непосредственно воспроизвести навигационные методы летучих мышей в качестве средства обеспечения безопасности плавания океанских судов. К сожалению, он не знал по-настоящему способы навигации летучих мышей — по той простой причине, что после Спалланцани этим вопросом пренебрегали. Предположение Мэксима об использовании летучими мышами принципа эхолокации было правильным, однако он ошибочно считал, что сигналом является звук взмахов их крыльев. Поэтому он рекомендовал оборудовать суда источником звука очень низкой частоты, порядка 15 *гц*, а устройства для приема этих низкочастотных звуков предлагал установить в носовой части корабля. Слабые эхо должны были приводить в действие маленький колокольчик, а сильные — большой гонг, чтобы команда судна могла судить о серьезности опасности.

Идея Мэксима все же была шагом вперед к пониманию механизма навигации летучих мышей, так как здесь впервые была высказана мысль, что в основе загадочной способности летучих мышей летать в темноте лежат звуки, не слышимые человеческим ухом. Однако его идеи не привели к созданию практических методов обнаружения айсбергов, и причиной этому были по крайней мере два важных фактора. Во-первых, предложенные им низкие частоты обозначали использование больших длин волн: частоте 15 *гц* соответствует длина волны 20 м. В наши дни хорошо известно, что объект, размеры которого значительно меньше длины волны звука, дает лишь очень слабые эхо, но в 1912 г. этому факту еще не придавали должного значения. Если бы ученые не смотрели свысока на летучих мышей и были ближе знакомы со «спалланцаниевой проблемой», то к 1912 г. удалось бы достигнуть больших успехов. Во-вторых, Мэксим предлагал производить звуковую локацию айсбергов в воздухе, в то время как фактическая опасность грозит кораблю от подводной части айсберга, которая к тому же больше надводной части. Это последнее соображение заставило других изобретателей изучить возможность использования подводного звука.

Через два или три года после гибели «Титаника» возрастающее использование подводных лодок немецким военным

флотом заставило ускорить разработку подводных звуковых устройств. Сначала ограничивались подслушиванием звуков, исходивших от подводных лодок, главным образом от их двигателей и гребных винтов. До сих пор пассивное подслушивание под водой шума кораблей составляет значительную часть применения подводного звука в военных флотах. Однако в малом масштабе уже к 1918 г., а в гораздо большей степени к 1940 г. научные исследования привели к возможности активного зондирования моря при помощи звуков, позволяющих получить эхо, поддающееся обнаружению. Основными военными целями были вражеские подводные лодки, но наряду с разработкой сонара появился и эхолот — прибор для измерения глубины водоема.

Казалось бы, что дно моря — легче обнаруживаемая цель, чем вражеская подводная лодка (или чем рыбка для дельфина). Однако в течение ряда лет оказывалось, что предложить метод легче, чем его осуществить. В глубоководных областях океана эхо даже от дна получалось таким слабым, что при помощи первых моделей сонара его трудно было обнаружить. Но хуже всего приходилось в мелководных и потому наиболее опасных местах. Трудность заключалась в помехе, идущей от корпуса судна: корпус «звенел», давал «послезвучание». В результате общая длительность звука превосходила время, потребное для пробега сигнала до дна океана и обратно. Другими словами, здесь возникали трудные задачи *различения* сравнительно слабого эхо — его отделения от непрерывившегося исходного звука. Приборы столкнулись с теми же трудностями, которые делают слепых менее искусными в эхолокации, чем летучие мыши и дельфины. Технически эта задача была частично решена после того, как научились создавать подводные звуки меньшей длительности.

К 1950 г., однако, эхолот был усовершенствован и доведен до такой степени надежности, что он стал почти необходимым навигационным прибором. Чувствительность его настолько повысилась, что он стал давать сигналы «ложного дна» между кораблем и настоящим дном. Обнаружение «ложного дна» на двух-трех глубинах выше истинного дна было поражающим открытием, но вскоре рыбаки, использовавшие эхолоты, стали замечать, что в некоторых случаях «ложное дно» оказывалось отражением от косяка рыб.

Вслед за этим почти везде в открытом океане на глубинах в несколько сотен футов были замечены таинственные слои,



дававшие слабое эхо рассеянного звука. Их называли *глубоководными рассеивающими слоями*; как обнаружилось впоследствии, эти слои перемещаются вверх и вниз в утренние и вечерние сумерки. Этот факт послужил ключом к выяснению их природы. Проводя систематический лов сетями, океанографы давно заметили, что большие популяции креветок и других мелких морских животных живут на глубинах, куда солнечный свет почти не проникает. При этом оказалось, что в полдень они держатся на большей глубине, чем в полночь. Это указывает на массовое перемещение в вертикальном направлении: вверх по вечерам и снова вниз на рассвете. Оказалось, что записи глубины рассеивающих слоев как раз согласуются с таким поведением животных.

Как только этот факт был установлен, эхолот сделался ценным орудием биологических исследований, так как теперь при его помощи стало возможным точное изучение вертикальных перемещений животных. Само собой разумеется, что отражения от глубоких рассеивающих слоев ничего не могут сказать о том, какие виды животных их создают, так что и до сих пор не известно с достоверностью, дают ли эхо в основном креветки, рыбы или, возможно, головоногие.

Во время второй мировой войны сонары с успехом применялись для эхолоцирования вражеских подводных лодок. В одном типе сонара имеется передающий гидрофон, или подводный громкоговоритель, излучающий звук мощностью 600 ватт. Заметим, для сравнения, что в тихом помещении минимальная слышимая мощность звука при частоте, отвечающей наибольшей чувствительности слуха, равна  $10^{-16}$  ватт на  $1 \text{ см}^2$ ; громкий крик вблизи создает мощность  $10^{-4}$  ватт на  $1 \text{ см}^2$ . Таким образом, сонар передает в океан звуковую мощность, соответствующую 6 000 000 громким крикам. Эти мощные лоцирующие звуки излучаются в виде коротких импульсов длительностью в одну или две десятых секунды: Частота системы может быть выбрана произвольно в пределах от 10 000 до 26 000 *гц*. Так как скорость звука в морской воде равна примерно 1500 *м/сек*, то длина волны такого звука будет составлять от 5,8 до 15 *см*, а длина всего звукового сигнала в пространстве будет составлять от 150 до 300 *м*.

Используемый в этой системе диапазон частот лежит частично за пределами человеческого восприятия, поэтому требуется какое-нибудь устройство для преобразования

этих звуков в слышимые. Быть может, вы знаете, что такое «разностный тон», или «тон частоты биений», замечаемый при одновременном звучании двух почти совпадающих нот. Так, если частота одной ноты равна 500 *гц*, а второй 600 *гц*, то можно услышать еще третью ноту частоты 100 *гц*. Для этой цели в электрической цепи сонара создается *местная частота*, которая, комбинируясь с частотой приходящего эхо, дает слышимый разностный тон. Например, эхо частоты 22 000 *гц* вместе с местной частотой 23 000 *гц* дадут слышимый тон частоты 1000 *гц*. Поскольку исходный звук очень короткий, то и разностный тон также получится очень коротким и будет звучать как «пинг». Этот звук стал настолько привычным для моряков противолодочной обороны, что звуковая локация получила у них название «пингирования»<sup>1)</sup>.

При выборе наивыгоднейшей частоты подводного звука для получения эхо применяются те же общие соображения, которые оправдываются в случаях эхолокации у летучих мышей и у слепых людей. Желательно использовать короткие звуковые сигналы, так как тогда излучение звука окончится до возвращения эхо. Это значит, что звуковой сигнал не может состоять из слишком низких частот, иначе за время излучения сигнала был бы совершен только один или два цикла колебаний. Даже подводные лодки представляют собой небольшую цель, так что если их размеры окажутся меньше длины волны, то это приведет к уменьшению эхо. Далее, всегда имеющийся в море шумовой фон более интенсивен на низких частотах. С другой стороны, при распространении звука в воде, как и в воздухе, с повышением частоты растут потери энергии вследствие поглощения звука. У летучих мышей наиболее удовлетворяющий их аппарат для эхолокации выработался в процессе эволюции, но человек, конструируя сонар, должен учесть совместное действие всех этих факторов; оказалось, что наилучшим компромиссным решением является выбор рабочих частот эхолокации как раз в диапазоне 10 000—26 000 *гц*.

Многие виды летучих мышей, наиболее успешно применяющих эхолокацию, пользуются звуковыми сигналами, частота которых быстро меняется за время каждого короткого сигнала; в связи с этим интересно отметить, что конструкторы разработали аналогичную систему, улучшающую

---

<sup>1)</sup> Напоминаем, что речь идет об американском флоте. (Ред.)

работу сонара. В одном из образцов частота сигнала изменялась непрерывно от значения, на 800 *гц* превышающего среднюю частоту, до значения, на 800 *гц* меньшего этой частоты. Такое изменение частоты происходит, как и у «частотно-модулирующих» летучих мышей, внутри каждого отдельного звукового сигнала. При приеме эхо это изменение частоты можно услышать как изменение частоты разностного тона. В одном типичном варианте сонара частота сигнала, а значит и частота эхо, изменялась от 20 800 *гц* до 19 200 *гц*. При местной частоте 19 000 *гц* частота разностного тона изменялась от 1800 до 200 *гц*, что давало характерный звук «уиууоу». Одно из преимуществ этого метода состоит в том, что многочисленные эхо от корпуса судна и поверхности воды проходят к каждому моменту различные расстояния и поэтому приходят к приемному гидрофону с различными частотами. Это позволяет отличить по слуху полезный звук эхо от подводной лодки от шумового фона реверберации. Желаемое эхо имеет характерное звучание, в то время как мешающая реверберация — это нерегулярная непостоянная смесь разных частот. Вероятно, летучим мышам их частотно-модулированные звуковые сигналы дают такое же преимущество.

Заметим, что небольшое изменение частоты эхо по сравнению с местной частотой может сильно изменить высоту слышимого разностного тона. В связи с этим в сонаре другого типа применяют постоянную частоту сигнала, а оператор следит за малыми изменениями высоты разностного тона, вызываемыми движением цели относительно источника звука. Эти изменения высоты (так называемый *эффект Доплера*) можно использовать и для определения относительного движения цели. Между прочим, повышение звука свистка приближающегося поезда объясняется именно эффектом Доплера.

Для того чтобы уяснить себе возникновение эффекта Доплера, рассмотрим конкретный пример. Предположим, что корабль, оборудованный сонаром и идущий в восточном направлении со скоростью 10 *м/сек*, посылает звуковой сигнал частоты 20 000 *гц* длительностью 0,1 секунды, т. е. испускает в общей сложности 2000 звуковых волн. Упростим наши расчеты, принимая, что скорость звука в морской воде точно равна 1500 *м/сек*. Если бы судно оставалось неподвижным, то сигнал занял бы в воде участок длиной  $1500 \cdot 0,1 = 150$  *м*. Но судно идет со скоростью 10 *м* в секунду, и

за время, требуемое для излучения сигнала, содержащего 2000 звуковых волн, т. е. за 0,1 секунды, оно переместится на 1 м. Так как излучающий гидрофон догоняет излученный сигнал и за 0,1 секунды пройдет 1 м, то цуг волн, составляющих сигнал, вместится в участок длиной всего 149 м вместо 150 м. Это не повлияет на скорость звука в морской воде, так что проплывающий мимо дельфин услышал бы сигнал, состоящий из 2000 волн, занимающих участок длиной 149 м и бегущих, как и любые другие звуковые волны, со скоростью 1500 м/сек. Весь сигнал пройдет мимо дельфина за  $149/1500=0,099$  секунды, и частота составит поэтому 2000 волн за 0,099 секунды, или 20 202 гц. Другими словами, для дельфина в воде излученный сигнал имеет бóльшую частоту, так как корабль двигался вперед во время излучения. Скорость же звука зависит исключительно от среды, в которой он распространяется, но не от скорости источника звука.

Разовьем наш пример еще немного и предположим, что этот звуковой сигнал отразится от подводной лодки, движущейся также со скоростью 10 м/сек, но в западном направлении, навстречу лоцирующему кораблю. Сигнал, занимавший пространство в 149 м при встрече с дельфином, теперь сократится еще больше за 0,1 секунды, в течение которой будет происходить его набегание на приближающуюся подводную лодку. Отражаясь обратно от цели, он сократится еще один раз; оба раза сокращение сигнала произойдет в том же отношении 149/150.

Не каждый сразу сообразит, почему при отражении от подводной лодки сигнал сокращается *дважды*, но мысленное видоизменение физической ситуации может здесь помочь. Предположим, что сигнал не сразу отразился в виде эхо, но был принят на подводной лодке и записан на ленту магнитофона, а спустя некоторое время полученная запись была снова излучена в воду. Но лодка продолжала двигаться относительно воды как во время записи сигнала, так и во время вторичной его передачи; поэтому сокращение происходило и в том и в другом случае. Теперь будем уменьшать задержку времени между записью сигнала и его вторичным излучением. Это нисколько не повлияет на сокращение участка, занимаемого звуковыми волнами, и по-прежнему сигнал будет сокращаться *дважды* независимо от того, велико время задержки или малó. Значит, время задержки можно взять сколь угодно малым, и мы вернемся к исходному случаю мгновенного отражения.

Теперь дельфин услышит в воде эхо, содержащее 2000 звуковых волн и занимающее участок длиной лишь около 147 м. Если быть очень придирчивым, то можно сказать, что  $150 \cdot \frac{149}{150} \cdot \frac{149}{150} \cdot \frac{149}{150}$  будет несколько больше, чем 147. Но это, конечно, очень малая разница, а я обещал по возможности упрощать выкладки.

Наконец, наши 2000 звуковых волн достигают гидрофона лоцирующего корабля, который по-прежнему движется вперед со скоростью 10 м/сек, и сокращение длины сигнала повторяется в последний раз. В результате время, необходимое для приема этих 2000 волн, окажется меньше, чем время, требуемое для их передачи. Разность этих времен составляет  $0,1 - 0,1 \left(\frac{149}{150}\right)^4$ , или приблизительно 0,03 секунды.

Эффект Доплера можно описать несколько проще, если рассматривать только относительное движение сонара и цели. В нашем случае эти точки приближались друг к другу со скоростью 20 м/сек. Длина сигнала принимаемого эхо сократилась на величину, пропорциональную квадрату отношения скорости сближения к скорости звука. Ясно, далее, что если бы судно и подводная лодка удалялись друг от друга, то эффект Доплера действовал бы в обратном направлении и в результате частота эхо понизилась бы.

Возвращаясь к нашему примеру, найдем, что принимаемое на лоцирующем корабле эхо будет иметь частоту  $20\,000 \cdot \left(\frac{150}{149}\right)^4$ , т. е. около 20 540 гц. Если теперь, комбинируя эхо с сигналом местной частоты в 19 000 гц, получить слышимый разностный тон, то его частота будет равна 1540 гц, вместо 1000 гц в случае, когда оба корабля неподвижны.

В разобранном примере был взят уж очень крайний случай быстрого сближения кораблей; но и на практике оказывается, что операторы системы сонар могут по разностному тону узнать, когда лодка поворачивает и даже когда она увеличивает или уменьшает свой ход. Хотя мы значительно меньше понимаем то, что происходит в мозгу летучей мыши или дельфина, чем работу сонара, разумно предположить, что аналогичное сравнение частот излучаемого звука и его эхо может быть использовано и животным для обнаружения движения летящего насекомого или плывущей рыбы. Возможно, что летучие мыши-подковоносы, издающие звуковые

сигналы постоянной частоты, могут в большей степени пользоваться эффектом Доплера, чем «частотно-модулирующие» летучие мыши, но даже эти последние, по-видимому, в меньшей степени меняют частоту сигнала, настигая насекомое, чем во время своего обычного полета, когда они, вероятно, добиваются только обнаружения насекомого.

### Применение эхо для геологических изысканий

Звуковые волны распространяются не только в воздухе или воде, но и в любых твердых материалах. Иногда эхолот, предназначенный только для эхолокации дна, указывает на наличие ложного дна, не связанного ни с косяками рыб, ни с глубоководными рассеивающими слоями, описанными выше. Именно, случается, что записи эхолота дают второе и третье дно *ниже* настоящего дна. Это значит, что к кораблю возвращается зондирующий сигнал от настоящего дна, а несколько позже приходит еще одно эхо. При первом взгляде на запись опытный физик мог бы предположить, что сигнал дважды пробежал до дна и обратно: вниз до дна, вверх до поверхности воды, снова вниз до дна и, наконец, вверх, в качестве второго эхо. Так, конечно, может случиться, но тогда время пробега второго эхо окажется точно в два раза больше времени пробега первого эхо. Однако во многих случаях время пробега от ложного дна вовсе не оказывается равным двойному времени пробега первого прямого эхо. В действительности при определенных условиях часть звуковой энергии проникает сквозь ил или песок, покрывающие дно океана, идет вниз и затем отражается вверх от какой-нибудь резкой границы раздела, например, от скалы, имеющей другую твердость и плотность. Делая определенные предположения о скорости звука в грунте непосредственно под дном океана, геологи довольно точно могут определить глубину таких резких изменений свойств грунта. Таким образом конструкторы эхолотов, а также персонал, использующий эхолоты, совершенно случайно натолкнулись на метод эхолокации под землей.

Между тем другие геологи в течение многих лет имели своей задачей именно изучение распространения звуковых волн на целые мили в глубь земной коры. Колебания почвы, вызываемые землетрясениями, могут быть обнаружены при помощи тонких инструментов — так называемых сейсмографов. Такие же колебания вызываются достаточно мощными

взрывами, осуществляемыми человеком. Взрывы шпуров в рудниках и каменоломнях заметны на расстояниях во много миль, а обнаружение ядерных взрывов при помощи сейсмографических методов приобрело огромное значение и стало предметом горячих дебатов на международных конференциях. Записи колебаний почвы, обусловленных землетрясениями, делались в различных точках земного шара; сопоставление этих записей позволило установить, что некоторые волны распространяются вблизи земной поверхности, другие проникают в более глубокие слои, а третьи — распространяются на глубинах в сотни миль под поверхностью. Тщательное изучение моментов прихода этих волн на различных приемных станциях дало геологам больше сведений о строении нашей планеты, чем любой другой метод.

Волны, фактически регистрируемые сейсмографами, соответствуют очень низкой частоте; форма этих волн настолько нерегулярна, что трудно и даже бессмысленно говорить о какой-то одной определенной частоте. Главные компоненты варьируют в пределах от 0,5 до 5 *гц*. Сейсмические волны отличаются от звуковых волн, распространяющихся в воздухе или воде, еще тем, что направление движения частиц среды в них отличается от направления распространения волны. Существует несколько различных типов сейсмических волн, соответствующих тому или иному распределению движений в разных направлениях. Кропотливый анализ сейсмических записей, сделанных в различных точках на поверхности земли и в глубине и в различных направлениях от места экспериментального взрыва, позволяет геологам установить структуру пород, залегающих под поверхностью земли. Этот способ оказался очень полезным для разведки нефти, или, вернее, для разведки типов пород и залегающих соли, обычно сопровождающих нефтяные месторождения. Успешному применению метода эхолотации для разведки нефти мы в значительной мере обязаны развитием нашей промышленности.

### **«Эхо-анализ» и рентгеновский анализ**

Широкое применение получили звуковые волны и для «неразрушающего» испытания (дефектоскопии) таких материалов, как металлы и резина. Чистые и однородные материалы пропускают звук без искажений. Если же имеются неоднородности, например пузырьки воздуха в отливках или

дефекты в оболочках шин, проходящие звуковые волны искажаются. Чтобы получить отчетливые эхо внутри испытуемого материала, в некоторых случаях пользуются очень короткими звуковыми импульсами. Частоты звука нередко доходят до 1 мегагерца ( $10^6$  гц), что оказывается возможным, потому что расстояния, на которые передается звук, сравнительно малы. Это — дешевый метод испытания, если учесть риск аварии ценного механизма вследствие дефекта в материале; испытуемый же материал при этом совершенно не повреждается.

Недавно методы дефектоскопии были применены и к тканям живых организмов животных и человека. Создавая на поверхности тела звуковые волны при помощи соответствующего источника колебаний, например кварца, колеблющегося с высокой частотой под действием электрического тока, можно обнаружить неоднородности в наших внутренних органах. Применение этого метода не лишено риска, так как мощные звуковые волны внутри организма могут причинить вред. Но при правильном контроле он дает некоторые преимущества по сравнению с рентгеновским исследованием. Во всяком случае, звуковая волна может причинить только локальные повреждения, и, насколько нам известно, она не производит длительного вредного действия на наши гены — имеющиеся в наших органах размножения сложные молекулы, определяющие наследственность.

Наличие в нашем теле большого числа естественных границ раздела, например границ между мышцами и костями, границ пищеварительного тракта, кровеносных сосудов, сердца и легких и т. д., ограничивает применение метода эхолокации. Эти естественные границы раздела образуют сложный фон, из которого трудно выделить аномальное отражение, так что установить наличие опухоли в мозгу человека оказывается труднее, чем обнаружить пузырек воздуха в чугунной трубе. Все же не исключена возможность, что благодаря этому новому средству для исследования невидимых внутренних органов удастся найти более безопасные или более эффективные методы диагностики внутренних расстройств на более ранней, еще излечимой стадии. Может оказаться, что и здесь задача различения будет не труднее аналогичных задач, разрешаемых летучими мышами и слепыми людьми, и человек с присущей ему изобретательностью сможет со временем разрешить ее вместе с другими задачами, рассмотренными в предыдущих главах.



## Радар

Способ обнаружения дальних самолетов по отражениям от них радиоволн нужно отнести к числу крупнейших технических достижений человека. Большие наземные и корабельные радиолокационные системы обнаруживают самолеты на расстояниях в сотни миль, а малые самолетные радиолокаторы способны не только обнаруживать другие самолеты, но и различать удивительно большое число деталей наземных объектов. Специально разработанные радиолокаторы могут за долю секунды нарисовать на экране специального катодно-лучевого осциллоскопа приблизительную карту местности площадью в сотни квадратных миль. Радарные эхо позволяют обнаруживать и следить за облаками, штормовыми центрами, за стаями птиц, саранчи, за метеорами, спутниками Земли, баллистическими ракетами. Вскоре после второй мировой войны удалось осуществить радиолокацию Луны. В 1958 г. были впервые получены слабые эхо от планеты Венеры<sup>1)</sup>.

Мы здесь не можем вдаваться в подробности, касающиеся радиолокации, но некоторые основные общие черты ее с звуковой эхолокацией стоит рассмотреть; удастся даже сделать грубое сравнение между работой и эффективностью радиолокационных систем и природных живых систем, развившихся у летучих мышей и обеспечивающих их ориентацию и способность ловить насекомых в темноте.

### Сравнение эффективности эхолокации летучих мышей и радара

Здесь, как и выше при описании сонара, будем исходить из моделей радиолокаторов, которые хорошо зарекомендовали себя во вторую мировую войну и ныне заменены более совершенными моделями. Для большей осмысленности сравнения я выбрал типичный самолетный радиолокатор, который явился в свое время триумфом инженерного искусства и был, при сравнительно малом весе и малой потребляемой мощности, эффективнее предыдущих более громоздких моделей. Он работал на частоте 9375 мегагерц (длина волны  $\lambda = \frac{3 \cdot 10^{10}}{9,375 \cdot 10^9} = 3,2 \text{ см}$ ). Несмотря на то, что эта

---

<sup>1)</sup> В 1959 г. была осуществлена и радиолокация Солнца. (Ред.)

частота неизмеримо выше частот, используемых летучими мышами, дельфинами и морскими сонарами, длины применяемых в этих случаях звуковых и электромагнитных волн близки друг другу, так как скорость света и всех других электромагнитных волн соответственно больше скорости звука. В момент испускания сигнала мощность описанного выше сонара составляла 600 ватт, соответственная же мощность радиолокатора составляла 10 000 ватт.

Важно подчеркнуть, что ни животные, ни локаторы не испускают энергию непрерывно. Отношение интервала работы к интервалу покоя невелико и у тех, и у других. При нормальной работе радиолокатор посылает импульсы длительностью 0,8 микросекунды ( $8 \cdot 10^{-7}$  секунды) с частотой повторения 810 импульсов в секунду. Иначе говоря, через интервалы  $\frac{1}{810} = 1,23 \cdot 10^{-3}$  секунды излучается сигнал длительностью в  $8 \cdot 10^{-7}$  секунды, за которым следует в 1500 раз более длительный интервал покоя. Таким образом, до передачи следующего сигнала остается вполне достаточно времени для прихода эхо предыдущего импульса, бегущего со скоростью света. Вся радиолокаторная система, не считая самолетного генератора электропитания, весила 124 фунта (примерно 56 кг). Этот радиолокатор представлял собой блестящее достижение и позволял обнаруживать самолеты с дистанции 50 миль почти при любых условиях. Поэтому любопытно сравнить его с локационной системой летучих мышей, грамм на грамм и ватт на ватт.

Сравнение это не так просто произвести, потому что оба класса этих локационных систем используются в совершенно различных условиях. Летучая мышь должна обнаруживать мелких насекомых на расстоянии нескольких футов или ярдов. Летчик же стремится лоцировать объекты на земле и другие самолеты в воздухе на расстоянии в несколько миль. Летучая мышь использует звуковые волны, а радар — радиоволны почти той же длины. Летучая мышь очень быстро маневрирует, успевая за одну секунду выполнить целый ряд действий: обнаружение насекомого, поворот в его сторону, перехват, поимка и поедание. Оператор самолетного радиолокатора в обычных условиях наблюдает за пятном на экране осциллографа, отмечает его перемещение относительно направления своего собственного полета и затем избирает соответственный путь действий. Если речь

идет об опасности столкновения двух пассажирских самолетов, то принятой мерой может быть изменение направления полета. На военном самолете во время войны результатом наблюдения может быть преследование вражеского самолета и его обстрел. В обоих случаях все эти операции производятся человеком, сидящим в затемненной кабине и следящим только за пятнами, которые движутся на экране его радара. Летучая мышь, используя свой мозг, размерами не больше резинки для стирания, насаженной на конце карандаша, прodelывает все в темноте в течение одной секунды.

Для количественного сравнения эффективности обеих систем удобно свести в таблицу все известные для них величины. В таблице на стр. 91 приводятся приближенные значения дальности действия, веса и излучаемой мощности радиолокатора. От эффективной системы эхолокации требуется, чтобы она при наименьшем весе и минимальной используемой мощности обнаруживала объекты наименьшей величины на максимальных расстояниях. Громоздкие установки с быстро поворачивающимися частями могут на первый взгляд показаться внушительными, однако в действительности излишняя сложность и большая потребляемая мощность указывают на низкий коэффициент полезного действия.

Имея это в виду, мы постараемся установить показатель эффективности, учитывающий все эти четыре наиболее важных фактора. Такой показатель должен иметь наибольшее значение для самой эффективной системы, а также должен быть примерно пропорционален относительным эффективностям различных сравниваемых между собой систем. Ниже станет ясно, что найти такой показатель не так просто, как кажется; однако процесс его отыскания и внесения необходимых изменений и поправок приносит большую пользу сам по себе, так как при этом привлекается внимание к различным количественным соотношениям, имеющим важное значение для эхолокации.

В таблицу входят: дальность обнаружения  $R$ , диаметр цели  $d$  (обе эти величины выражены в сантиметрах), излучаемая мощность  $P$  (в ваттах) и вес системы  $W$  (в граммах). У летучих мышей на гортань, уши, слуховые участки мозга и прочие органы, непосредственно участвующие в эхолокации, приходится не более 10% полного веса данного экземпляра. Под излучаемой мощностью всегда будет подразумеваться максимальное значение мощности за цикл. Здесь следует вспомнить, что согласно приведенным в главе 2

	Радиолокатор системы AN/APС-10	Большая рыжая летучая мышь	Малая рыжая летучая мышь
Обнаруженная цель . . .	Самолет	Насекомое	Проволока
Диаметр цели $d$ (см) . .	300	1	$1,8 \cdot 10^{-2}$
Дальность обнаружения $R$ (см) . . . . .	$8 \cdot 10^6$	200	90
Вес аппаратуры $W$ (в граммах) . . . . .	$9 \cdot 10^4$	1,0	0,5
Излучаемая мощность $P$ (в ваттах) . . . . .	$10^4$	$10^{-5}$	$10^{-6}$
$R/PWd$ . . . . .	$3,0 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^7$	$10^{10}$
$R^3/PWd^2$ . . . . .	$5,1 \cdot 10^{13}$	$1,6 \cdot 10^{14}$	$4,1 \cdot 10^{17}$
$R^4/PWd^4$ . . . . .	$5,6 \cdot 10^3$	$1,6 \cdot 10^{14}$	$1,3 \cdot 10^{21}$

данным летучие мыши и человек воспринимают звук в диапазоне мощностей от  $10^{-16}$  до  $10^{-4}$  ватта на  $1 \text{ см}^2$ .

Сравним самолетный радиолокатор, обнаруживающий другой самолет на расстоянии 50 миль, с двумя случаями эхолокации у летучих мышей: большая рыжая летучая мышь обнаруживала присутствие насекомого (или камешка) диаметром 1 см с расстояния около 2 м, а малая рыжая летучая мышь лоцировала с расстояния 90 см проволоку диаметром 0,18 мм.

Первый подход к определению показателя эффективности мог бы заключаться в том, что мы отнесем в числитель дальность  $R$ , а в знаменатель — мощность  $P$ , вес  $W$  и диаметр цели  $d$ . С возрастанием последних трех факторов показатель эффективности будет уменьшаться. Если исходить из такого выражения  $R/PWd$  для показателя эффективности (см. таблицу), то окажется, что летучие мыши обладают локационной системой, в миллиарды раз более эффективной, чем радиолокатор. Однако небольшое размышление покажет, что выбранное выражение для показателя эффективности необоснованно предопределило связь величин  $R$ ,  $P$ ,  $W$  и  $d$ ; например, из этой формулы следует, что дальность прямо пропорциональна мощности. Но у всех радиолокаторов и, вероятно, у всех летучих мышей плотность излученной энергии убывает при распространении обратно пропорционально квадрату расстояния; эхо большинства малых целей также подчиняется закону обратных квадратов. В главе 4, при сравнении насекомоядной летучей мыши с гипотетическим

случаем летучей мыши-рыболова, пытающейся при помощи эхолокации обнаружить рыбу через границу раздела воздух—вода, было показано, что энергия эхо пропорциональна  $1/R^4$ . Таким образом, для увеличения дальности в два раза мощность системы эхолокации должна быть повышена в  $2^4$ , т. е. в 16 раз. Исходя из этого, мы должны в числителе заменить  $R$  на  $R^4$ . Тогда оценка эффективности радиолокатора, обнаруживающего самолет на дистанции 50 миль, значительно повысится.

После внесения этой поправки необходимо тщательно проанализировать роль остальных переменных величин нашего уравнения, в частности роль размеров обнаруживаемой цели  $d$ . Если размеры цели достаточно велики по сравнению с длиной волны отражаемого от нее звука, то мощность эхо приближенно пропорциональна поверхности цели, т. е.  $d^2$ . Так обстоит дело с большинством радарных целей и, в частности, при локации самолетов, при которой используются волны длиной 3,2 см. Но удовлетворено ли это условие для летучей мыши? Размеры насекомых, которых она ловит, варьируют от величины, меньшей одной длины волны, до нескольких длин волн, а «частотно-модулирующая» летучая мышь использует сигналы, содержащие целую октаву, т. е. изменение длин волн вдвое в каждом импульсе. По всей вероятности, можно считать, что и мощность эхо от насекомого пропорциональна квадрату его размера, хотя возможны случаи, когда размеры насекомого настолько меньше длины волны отражаемого от него звука, что мощность эхо получится преувеличенной. На основании этих соображений в следующую строчку таблицы введены значения показателя эффективности, соответствующие выражению  $R^4/PWd^2$  для всех трех систем. Но даже и по этому критерию летучие мыши превосходят радиолокатор по эффективности.

Наконец, нам следует уделить несколько больше внимания летучим мышам, обнаруживающим присутствие проволок, диаметр которых много меньше одной длины волны. Речь идет о малой рыжей мыши. В тех случаях, когда диаметр проволок или других цилиндрических препятствий меньше одной длины волны, мощность эхо от них пропорциональна  $d^4$ . К этому классу препятствий относятся, конечно, и проволоки диаметром 0,18 мм, обнаруживаемые малой рыжей летучей мышью с расстояния 90 см. Объекты такого размера вызывают *рэлеевское рассеяние*, названное так по

имени физика XIX века Рэлея, изучавшего это явление в связи с рассеянием света малыми частицами, взвешенными в воздухе. Глядя на небо, мы видим главным образом рассеянный свет, а так как рассеивающие частицы меньше длин волн видимого света (от 4 до  $7 \cdot 10^{-5}$  см), то короткие волны в спектре рассеиваются больше, чем длинные. Поэтому небо имеет синий цвет. Мы могли бы сказать, по аналогии, что при приближении к тонким проволокам летучая мышь должна слышать «синее эхо». Во всяком случае, можно было бы привести доводы в пользу показателя эффективности звуколокационной системы летучей мыши, содержащего вместо  $d$  или  $d^2$  множитель  $d^4$ . Выражение для показателя эффективности приняло бы окончательно следующий вид:  $R^4/PWd^4$ . Его значения для всех трех систем приведены в последней строке таблицы.

Из сказанного ясно, как существенно меняется значение показателя эффективности в зависимости от выбора самого определения показателя. Здесь могут, конечно, возникнуть серьезные возражения против осмысленности числового сравнения столь разнородных систем эхолокации. Кроме того, при этом сравнении не были учтены некоторые другие важные факторы. Эхо звуковых сигналов летучих мышей при распространении в воздухе заметно ослабляются вследствие поглощения, особенно на высоких частотах. При частоте 50 килогерц к потерям мощности эхо на пути от летучей мыши до цели и обратно, пропорциональным четвертой степени расстояния, добавляются еще потери на поглощение, которые можно учесть, вводя «множитель ослабления» 0,63 на каждый метр расстояния. Для звука с частотой 100 килогерц этот множитель равен 0,44 на каждый метр расстояния. Радиоволны при распространении в воздухе не несут таких потерь на поглощение. Поэтому на больших расстояниях летучая мышь оказывается в менее благоприятном положении.

Есть и еще соображение, согласно которому радиолокатор имеет преимущество над летучей мышью. Это — «скважность» сигнала, т. е. доля общего времени, в течение которой производится излучение сигнала. В типичных случаях, подобных приведенным в таблице, летучая мышь издает 10—20 импульсов в секунду, каждый длительностью от 2 до 5 миллисекунд. Следовательно, для нее скважность колеблется в пределах от 0,02 до 0,1. А для радиолокатора скважность гораздо меньше: интервал между сигналами в

1500 раз длиннее самого сигнала, так что скважность составляет около 0,0007. Если бы мы при сравнении исходили не из максимальных, а из средних мощностей, то это понизило бы показатель для летучей мыши в 100 раз. В качестве возражения сторонники летучих мышей могли бы сказать, что вес локационной системы летучей мыши был нами принят равным 10% ее полного веса, в то время как вес радиолокатора составляет гораздо меньшую долю веса самолета, на котором он установлен. Быть может, с точки зрения самой летучей мыши было бы справедливее сравнивать ее полный вес с весом самолета в целом.

Если подходить к данному вопросу с самой общей точки зрения, то превосходство летучих мышей и других животных сразу становится очевидным, хотя такое сравнение и трудно выразить в количественной форме. Летучие мыши сами поддерживают в рабочем состоянии и ремонтируют свои живые механизмы. Радиолокаторы и самолеты должны ремонтироваться человеком. Летучие мыши питают свои механизмы энергией за счет добычи, которую они сами ловят и переваривают. А от самолетов мы не ждем, чтобы они сами заправлялись топливом за счет ловли птиц; топливо же, накачиваемое в их баки, уже не требует никакой предварительной химической переработки. И, конечно, изготовленные человеком механизмы не размножаются. Необычайность же результата проведенного нами сравнения заключается в том, что живые механизмы выдерживают и прямое сравнение с радиолокатором почти на тех же условиях, на каких обычно инженеры сравнивают между собой технические свойства двух радиолокаторов. Результаты сравнения вызывают у нас заслуженное уважение к механизмам из плоти и крови, которые выработались под давлением естественно-го отбора в процессе эволюции.

---

## ГЛАВА 6

### ЕСЛИ БЫ ВЫ БЫЛИ СЛЕПЫМ

В предыдущих главах мы изучали волны и эхо, чтобы лучше понять, каким образом животные и люди пользуются эхолокацией для обнаружения объектов, имеющих для них жизненное значение. Такие исследования природных явлений зачастую представляются бесплодными почти всем людям, но, к сожалению, так же бывает и с многими другими научными исследованиями. Однако, как ясно показывает история, человек улучшил условия своей жизни именно благодаря своему стремлению изучить неведомое. Открытие новых соотношений, получение новых сведений, помогающих лучше познать окружающий мир, несут нам истинное внутреннее удовлетворение, сколь незначительными ни казались бы они в данное время. Мы часто надеемся, что наши наблюдения и новые данные когда-нибудь будут использованы для дальнейшего улучшения нашей жизни. Что может быть более полезно, чем попытка применить только что приобретенные новые знания для помощи слепым людям? Сможем ли мы помочь им «видеть» ушами, выучиться языку эхо?

Для человека, весь уклад жизни которого, да и сам мозг, построены на пользовании светом и зрением, слепота всегда является трагедией. Правда, глаза для человека — единственный канал связи с окружающим миром, и слух в некоторых отношениях даже может оказаться важнее зрения. Так, наше зрение охватывает несколько менее одной октавы по частоте световых волн, с длинами от 4 до  $7,5 \cdot 10^{-5}$  см, в то время как слышимые частоты охватывают диапазон от 20 до 20 000 гц, т. е. тысячекратное изменение частоты — около десяти октав. Слышимый звук может, таким образом, содержать более богатый набор частот, чем видимый свет,



и отчасти поэтому для основного средства связи — речи — применяется звук, а не свет. Это, конечно, не единственная причина; ведь за исключением очень немногих люминесцирующих животных и растений живые организмы вообще не способны излучать свет.

Свет меньше подходит для речи и передачи сообщений на короткие расстояния еще и потому, что он отбрасывает резкие тени. Звук годится для переговоров и сигнализации, так как он легко огибает углы и, к тому же, возникает почти при любом движении или контакте между человеком или животным и их физическим окружением. Большим достоинством света является для нас то, что благодаря коротким длинам волн он зеркально отражается даже от объектов малых размеров. Поэтому глаза и линзы могут фокусировать свет и дают резкие изображения, правильность которых нарушается только тогда, когда мы хотим рассмотреть под микроскопом частицы, недостаточно большие по сравнению с длиной волны света. Когда частицы становятся меньше 1 микрона (одной миллионной доли метра), то они начинают рассеивать, а не отражать свет.

Если бы звуковые и световые волны не существовали сами по себе, то наверное нашлись бы ученые, которые стали бы их изобретать. Световые волны — для того, чтобы получать резкие изображения и иметь возможность рассматривать мелкие детали. А звуковые волны с их богатым частотным спектром — для передачи сложной информации с минимальными помехами со стороны объектов, способных отбрасывать тень. Волны обоих типов дополняют друг друга, и хотя потеря органа чувств для одного из типов весьма серьезна, каждое из этих чувств может частично заменять другое.

### **Чувство препятствия**

Слепота всегда была одним из распространенных человеческих бедствий, и хотя ни одно устройство, ни один способ не могут полностью заменить потерянное зрение, в течение всей многовековой истории слепые люди научались передвигаться в окружающем их мире и вести поражающе разнообразную деятельность. Многие слепые так искусно обходят препятствия и ориентируются в окружающей обстановке, что постороннему трудно поверить, что перед ним действительно слепой. Один слепой мальчик шести лет научился ездить на трехколесном велосипеде по тротуарам

вокруг своего дома без единого повреждения или проишествия. Приближаясь к прохожим, он объезжал их и всегда знал, где он должен повернуть, чтобы не съехать на мостовую. Некоторые слепые свободно разъезжают в оживленном городе, пересекая улицы, пользуясь автобусами и поездами, обходя фонарные столбы и проволочные изгороди. Каким образом они обнаруживают препятствия, не прикасаясь к ним? По этому вопросу было предложено много теорий как самими слепыми, так и зрячими людьми, работавшими или жившими вместе со слепыми. Любопытно, что наиболее искусные в избегании препятствий слепые сильно расходятся между собой в объяснениях этой способности. Многие из них говорят, что они чувствуют близость препятствия своими руками или лицом, и отсюда получил широкое употребление термин «зрение лицом» для описания ориентировки слепых относительно объектов, находящихся слишком далеко, чтобы к ним можно было прикоснуться. Другие считают, что здесь как-то участвует слух; третьи говорят о «давлениях» и других неясно определяемых ощущениях, предупреждающих их о грозящей им впереди опасности.

Очевидно, центральным вопросом является здесь физическая природа сигналов, передающихся слепому человеку от препятствия, и способ, которым сохраненные органы чувств воспринимают эти сигналы из внешнего мира и расшифровывают их. Примерно с 1890 по 1940 г. было выполнено много исследований по вопросу о «чувстве препятствия», но только в начале сороковых годов этого века, благодаря проведению тщательно контролировавшихся опытов, удалось дать окончательный ответ на этот вопрос. Хотя эти опыты были произведены учеными, именовавшими себя психологами, их можно считать классическими примерами работ по биофизике, т. е. по применению к решению задач, выдвинутых деятельностью живых организмов, тех основных методов исследования, которые превратили физику в точную науку. Определенная в таких общих чертах биофизика как наука отличается от физики неживых систем главным образом тем, что структура живых систем гораздо сложнее и тоньше. Люди и животные состоят из гораздо более сложных механизмов, чем хлопущки и водяные ванны, микроскопы и телевизоры. Поэтому наше понимание биологических процессов далеко не так глубоко и полно, как наше знание физики или химии.

Психологами или биофизиками, окончательно разрешившими вопрос о восприятии препятствий слепыми, были профессор Карл Далленбах из Корнельского университета и двое молодых ученых, один из которых, Майкл Супа, был совершенно слепым. Другой из них, Милтон Котцин, обладал нормальным зрением, но он и другие испытуемые, подвергавшиеся опытам, в течение многих часов подряд оставались с завязанными глазами для того, чтобы как можно лучше почувствовать условия жизни слепых и, в частности, чтобы в наибольшей степени развить в себе способность обнаруживать препятствия, не наталкиваясь на них. Прежде всего экспериментаторы устроили своего рода маршрут с препятствиями: длинный коридор, вдоль которого проходил испытуемый, и поперек которого в точке, выбираемой экспериментатором, устанавливался передвижной картонный экран. Положение экрана изменяли от опыта к опыту, так что испытуемый никогда не знал заранее, на каком расстоянии от начала маршрута находится экран (выбиралось расстояние 6, 10, 18, 24 или 30 футов или же экран совсем не ставился). Задача испытуемого заключалась в том, чтобы пройти по коридору, сообщить, когда он впервые почувствует, что приближается к экрану, и затем подойти к нему как можно ближе, не ударившись об него.

Некоторые испытуемые, как слепые, так и зрячие с завязанными глазами, могли уже с расстояния в несколько футов безошибочно судить о присутствии или отсутствии экрана и затем приближаться к нему, останавливаясь так, что лицо оказывалось всего в нескольких дюймах от экрана, лишь тогда считая, что дальнейшее приближение приведет к соприкосновению с экраном. Таким образом, явление обнаружения препятствия было осуществлено в лаборатории, где его можно было затем повторно наблюдать в достаточно постоянных условиях. Этот шаг часто является решающим в научных проблемах такого типа. Ускользающие, непредвиденные события гораздо труднее изучать, чем события, которые можно повторять при постоянных условиях. Только тогда оказывается возможным варьировать различные факторы, которые представляются существенными, и наблюдать получающиеся результаты. Первоначальные опыты по обнаружению препятствий слепыми людьми страдали от большого непостоянства результатов. Поэтому и не удавалось сделать окончательные четкие выводы из этих наблюдений. Однако Супа, Котцин и Далленбах построили

программу своих опытов именно на основании этого обширного, хотя и не вполне убедительного материала первых экспериментаторов. Не имея такой основы, они вряд ли смогли бы придумать свои решающие опыты.

После того как были установлены условия, в которых слепые и зрячие с завязанными глазами регулярно обнаруживали стандартное экспериментальное препятствие, следующим (теоретически очевидным, но трудным для осуществления) этапом должно было явиться исключение поочередно каждого из возможных путей восприятия препятствия у испытуемого, но так, чтобы оставлять ему свободное пользование всеми остальными возможными путями. Согласно одной из главных теорий, при близости к препятствию кожа испытывала своего рода чувство прикосновения или давления. По другой теории главную роль в обнаружении препятствий играл слух. Для проверки «теории давления на кожу» необходимо было защитить кожу от всех возможных воздействий, исходящих от препятствия. Трудность удваивалась благодаря тому, что никто не мог сказать, что это могло быть за воздействие: воздушные потоки, электромагнитное излучение, тепло или холод, или, наконец, энергия нового вида, еще пока не известного в физике. Для проверки второй теории, естественно, нужно было воспрепятствовать попаданию звуков к ушам испытуемых, но так, чтобы не помешать никаким возможным воздействиям на кожу, обусловленным близостью препятствия. Разумеется, защита кожи от внешних воздействий не должна была никак мешать слуху. В своем окончательном виде защитный костюм испытуемых состоял из толстого войлочного покрывала, закрывавшего голову и плечи, и тяжелых кожаных перчаток; остальная поверхность тела была закрыта обычным платьем. Эта защита была столь эффективна, что совершенно не ощущался поток воздуха от электрического вентилятора, направленный прямо на голову испытуемого. После нескольких предварительных попыток, потребовавшихся для того, чтобы привыкнуть ходить в этом «панцире», оказалось, что испытуемые почти полностью сохранили прежнюю способность обнаруживать препятствия. Так, если без покрывала и перчаток они впервые обнаруживали препятствие в среднем на расстоянии около 6,9 фута (2,1 м), то теперь это расстояние лишь немного уменьшилось и составляло 5,25 фута (1,6 м). Это, по-видимому, исключало возможность обнаружения препятствий по ощущениям на коже, несмотря на то, что первоначально

некоторые испытуемые, подобно многим слепым, были убеждены, что они именно *ощущали* присутствие препятствий руками или лицом.

В следующем опыте нужно было оставить совершенно открытыми лицо и руки, но закрыть уши испытуемого. Прежние опыты такого рода давали противоречивые результаты; способность к обнаружению то нарушалась, то оставалась без изменений. Полностью исключить проникновение звука при помощи ушной затычки невозможно, но Супа, Котцин и Далленбах хотели добиться того, чтобы в уши испытуемых попадало как можно меньше звука. Для этого они применяли затычки из воска и ваты, затем покрывали их наушниками и сверху накладывали еще подушечки. Такая многослойная преграда оказалась необходимой для того, чтобы не пропустить некоторых звуков, особенно низкочастотных, проникающих через обычные затычки или наушники. Каждый из нас на собственном опыте знает, что зимой в мороз можно свободно разговаривать с соседом, разве лишь немного повышая голос, несмотря на наушники или капюшон, полностью защищающие от зимнего ветра.

Примененная многослойная защита ушей оказалась настолько эффективной, что испытуемые не слышали звуков собственных шагов и приходилось давать им требуемые указания громким криком. Громкий крик, как известно, может обладать энергией, превосходящей энергию едва слышного шепота в  $10^9$  раз. Непосредственные измерения интенсивности звука, который могли слышать испытуемые в этих условиях, показали, что их слуховая чувствительность понизилась в 4 000 000 раз. Иначе говоря, уровень шепота, едва слышного незащищенным ухом, нужно было повысить в четыре миллиона раз для того, чтобы его можно было слышать при таком заглушении.

Когда те же испытуемые, но с ослабленным таким способом слухом попробовали обнаружить препятствия, то результат получился поразительный. Ни один не сохранил ни в малейшей степени способности обнаруживать препятствия, и каждый раз в сотне проб все наталкивались на экран неожиданно. Один из слепых, упорно твердивший, что звук не играет никакой роли в его «зрении лицом», теперь жаловался, что он не испытывает никаких ощущений, и впервые двигался неуверенным шагом, протягивая руки вперед, чтобы предохранить себя от ожидаемого столкновения. Если действительно слепые люди обязаны звуку своей способ-

ностью обнаруживать препятствия на расстоянии, то может возникнуть вопрос: почему же, когда испытуемые надевали покрывало и перчатки, среднее расстояние, на котором они впервые обнаруживали препятствия, все же уменьшалось? Вероятно, громоздкий капюшон своим эффектом экранирования понижал уровень звука, достигавшего ушей.

### Эхо помогает ориентировке

Казалось бы, эти опыты раз и навсегда разрешили вопрос; однако, если бы экспериментаторы на этом остановились, сомнения были бы еще возможны. Может быть давление ушных покрытий нарушало некое тонкое осязательное чувство? Может быть не слух предупреждает слепого о препятствии, а какого-то особого рода ощущение давления в ушном канале или на прилегающих участках кожи? Даже лица, в течение многих лет изучавшие этот вопрос, скептически отнеслись к возможности считать именно звуковые волны вестниками, предупреждающими слепых о препятствиях. Кроме того, многие слепые продолжали считать, что они *ощущают* близость препятствия. Для того чтобы окончательно убедить этих скептиков, необходимо было так поставить опыт, чтобы звук и только звук мог передавать необходимую информацию из внешнего мира нервной системе испытуемого. Такая задача могла показаться безнадежной; уж если описанные выше опыты оказались недостаточно убедительными, то какими доводами можно надеяться преодолеть подобный скептицизм?

Ответом явилось использование телефона для передачи звуков испытуемому, сидевшему в отдаленной и звуконепроходимой комнате. Другой человек шел по тому же маршруту с препятствиями и нес микрофон; звуки, улавливаемые микрофоном, передавались по телефонным проводам. Эти звуки были похожи на те, к которым испытуемый прислушивался бы сам в коридоре, желая обнаружить впереди себя препятствие (хотя и не тождественны с ними).

Результаты опыта с телефоном оказались поразительно близкими к результатам, полученным с теми же испытуемыми в исходном опыте. Сидя в звуконепроходимой комнате и слушая звуки, приходившие по телефону, испытуемые могли сказать, приближалось ли лицо, двигавшееся по коридору, к экрану или нет. При некотором навыке они стали впервые

обнаруживать присутствие экрана в среднем на расстоянии 6,4 фута (вместо 6,9 фута в опытах, когда они сами приближались к препятствию). Эти результаты как будто должны были рассеять все сомнения; никто не мог теперь утверждать, что здесь участвует что-либо кроме звука. Однако ученые, занимавшиеся такого рода исследованиями, научились крайней осторожности. Не раз бывало, что опыты, казавшиеся не менее убедительными, приводили к неправильным выводам. Представьте себе, например, что человек с микрофоном, приближаясь к экрану, изменял ритм дыхания или звук своих шагов и тем самым бессознательно извещал далекого слушателя о своем приближении к экрану. Случаи такой бессознательной сигнализации были известны и ранее; в частности, многие случаи так называемой мысленной телепатии объясняются подсознательной сигнализацией.

Эта возможность заставила предпринять новые опыты, в которых второй испытуемый, шагавший по коридору, был заменен тележкой с мотором; тележка, управляемая испытуемым, подвозила микрофон к экрану. Испытуемый, сидевший в звуконепроницаемой комнате, следил за движением тележки, руководствуясь звуками, которые принимались микрофоном. Как часто случается в научном эксперименте, новые факты возбуждают новые вопросы, и в конце опыта часто остается больше нерешенных вопросов, чем их было вначале. Вопрос, возникший здесь, имел важнейшее значение. Зная, что звуки передавались по телефонной линии, нужно было выяснить, какие именно из них предупреждали слепого о близости препятствия? В исходных опытах никаких мер для создания определенных звуков или для получения эхо не принималось; ведь экспериментаторы не были даже уверены в том, что звук играет какую бы то ни было роль. Они просто пытались перенести в лабораторию явление обнаружения препятствий и подобрать условия, в которых его можно было бы многократно наблюдать. Но убедившись в том, что именно звук, а не что либо другое, не передающееся по телефонным проводам, извещает слепого о наличии экрана перед ним, экспериментатор должен был выяснить природу этих звуков.

Звук шагов — вот первое, что приходило в голову; и действительно, опыт, в котором те же испытуемые ходили в одних носках по мягкому ковру, показал значительное ослабление их способности обнаруживать препятствия. Среднее расстояние первого обнаружения упало с 6,9 фута

(2,1 м) при ходьбе в ботинках по непокрытому полу до 3,4 фута (1,05 м) для случая, когда звук шагов был заглушен ковром. Некоторые испытуемые щелкали пальцами или издавали звуки вроде клохтанья, но другие, очевидно, полагались на любые звуки, слышные в коридоре, например, на звуки собственного дыхания или шуршания одежды. Когда разрабатывалась программа первых исследований, то вопрос о характере звуков не подвергался серьезному обсуждению, но теперь, когда исследование дошло до этапа, в котором микрофон нужно было установить на тележке, оказывались устраненными и звуки шагов, и шорох дыхания. Необходимо было заменить их каким-то другим звуком, что представило случай для исследования различных звуков с точки зрения их способности давать указание о присутствии или отсутствии препятствий. Ясно также, что опыт был связан с наличием эхо. Ведь если слушатель по звуку узнает о присутствии экрана, то это означает, что звук изменился по сравнению со случаем отсутствия экрана.

Для изучения характера эхо, используемого слепыми, на тележке был установлен, кроме микрофона, также и громкоговоритель. Теперь громкоговоритель мог создавать различные звуки с известными характеристиками, как это требовалось для дальнейших опытов. Когда громкоговоритель издавал громкий шипящий шум, т. е. шум, содержащий широкий диапазон слышимых частот, то испытуемые в звуконепроходимой комнате, воспринимавшие звуки по телефону, могли обнаружить приближение тележки к экрану. Но теперь расстояние, на котором обнаруживалось присутствие экрана, в среднем составляло 3,75 фута (1,15 м), т. е. меньше чем в опыте, когда по коридору двигался человек с микрофоном. Если учесть, как изменились условия опыта по сравнению с первоначальными, то все же этот результат производит большое впечатление. Были испробованы еще другие звуки, но тот идеальный звук, эхо которого позволяло бы лучше всего обнаруживать препятствие, открыть не удалось, и опыты были прекращены. Исследования закончились, потому что исходная проблема была решена до конца: было доказано, что звуки, а точнее,— звуковые эхо являлись вестниками, предупреждавшими слепых о наличии и положении препятствий.

В этом важном открытии поражает расхождение между субъективными ощущениями слепых и нашими объективными наблюдениями. Когда человек развил поразительную



способность передвигаться в современном городе с его оживленным движением, находясь субъективно в полной темноте, и делает это так искусно и непринужденно, что посторонний человек, наблюдающий его в течение многих часов, даже не подозревает о его слепоте, вполне естественно предположить, что он сам знает, что он делает и как он это делает. Однако очень часто этот весьма искусно ориентирующийся слепой говорит, что он как-то «ощущает» дорогу и «знает» о близости дерева или забора до того, как натолкнется на них. Если его расспросить подробнее, то он ответит, что он ощущает близость препятствия своими руками, лицом или лбом. Однако при изучении в лаборатории процесса обнаружения препятствий слепыми оказывается, что основными элементами здесь служат звук и слух. Кроме того, когда вся поверхность кожи слепого была защищена толстым войлоком и перчатками, это не мешало ему заблаговременно обнаруживать препятствие. Но «ощущения» на руках и на лице прекращались, когда его уши были плотно заткнуты, и если он все же продолжал свой путь, то всегда наталкивался на препятствие неожиданно. Ясно, что субъективные ощущения могут оказаться обманчивыми, и мы не всегда твердо знаем, какое именно из наших чувств информирует нас об окружающей обстановке. Отсюда не следует, что наши чувства не отличаются достаточной остротой; это значит только, что наше сознание может привести нас к неправильному выводу об их действии.

Это — не единственное наше заблуждение относительно действия наших органов чувств, хотя, может быть, самое сильное. Можно привести еще один пример, также связанный со слухом. Каким образом мы узнаем, откуда пришел звук? Иногда мы видим источник звука и поэтому знаем его положение; однако всякий способен и в темноте определить положение источника непривычного звука с большой точностью. Иногда, чтобы приближенно определить положение источника, мы поворачиваем голову настолько, что звук, воспринимаемый одним ухом, становится громче звука, воспринимаемого другим ухом, но чаще и точнее мы находим положение источника непосредственно по различию в самом звуке, приходящем к обоим ушам. В самом деле, ограничимся сейчас рассмотрением звука типа резкого щелчка. В пучке звуковых волн, образующих щелчок, самым важным свойством является время прихода первых его волн к обоим нашим ушам. Если источник звука расположен прямо

против нас, т. е. на равном расстоянии от обеих ушей, то первые волны придут к ушам одновременно. Если же щелчок исходит из точки, расположенной справа от этого прямого направления, то правое ухо услышит первые звуковые волны на мгновение раньше, чем левое. Если источник расположен на  $90^\circ$  в сторону от прямого направления, то противоположное ухо будет дальше от источника примерно на 20 см, а так как звуковые волны проходят около 30 см за одну миллисекунду, то это значит, что наибольшая возможная разность времен прихода звука к обоим ушам меньше 1 миллисекунды. И, однако, точность работы слуховых участков мозга такова, что мы легко различаем источники, расположенные прямо перед нами и смещенные всего на  $10^\circ$  в сторону. При расстоянии до источника 3 м отклонение направления на источник на  $10^\circ$ , которое различимо вполне отчетливо, соответствует разности времен прихода к обоим ушам около 0,1 миллисекунды. Если оба источника расположены прямо перед нами или где-либо в плоскости, равноудаленной от обеих ушей, то определить положение источника трудно. В таких случаях мы обычно двигаем головой так, чтобы одно ухо оказалось ближе к источнику звука, чем другое.

При помощи простого устройства, изображенного на рис. 15, можно проделать опыт, демонстрирующий роль разности времен прихода щелчка к обоим ушам. Оно состоит из источника щелчков (громкоговорителя или механической хлопушки), заключенного в звуконепропускаемый ящик, из которого выходят две трубки, заканчивающиеся наконечниками, похожими на наконечники медицинского стетоскопа. Следует пользоваться только мягкими наконечниками, во избежание случайных повреждений уха. Одна трубка имеет постоянную длину, а другая трубка выдвижная, как в тромбоне, и ее длину можно менять. Очевидно, при различных длинах обеих трубок первые звуки щелчка достигнут одного уха позже, чем другого. Зная разность длин трубок и скорость звука, можно вычислить разность времен прихода щелчка к обоим ушам. Если слушать щелчки при разной длине трубок, то получается полное впечатление прихода звука от источника, расположенного сбоку. Если при этом закрыть глаза и попытаться представить себе, что звуки щелчков приходят к вам не через трубки, а прямо по воздуху, то нельзя отделаться от иллюзии, что источник звука расположен со стороны уха, к которому ведет более

короткая трубка. Само собой разумеется, что для этого эффекта совершенно не важно, где в действительности расположен ящик с источником звука и какова полная длина обеих трубок. Точные измерения при помощи более совершенной аппаратуры того же типа показывают, что мини-

мальная разность времен прихода щелчков к обоим ушам, дающая уже иллюзию источника, расположенного сбоку, меньше 0,1 миллисекунды.

Нужны опыты именно такого рода, чтобы мы узнали об одном из главных способов, которым мы определяем положение источника звука. Мы сами никогда не думаем: «Щелчок дошел до моего правого уха на  $1/10000$  секунды раньше, чем до левого. Значит, звук должен приходиться несколько сбоку от средней плоскости, проходящей через мою голову». Мы непосред-

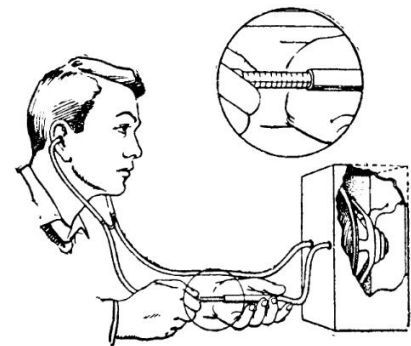


Рис. 15. При помощи данного устройства можно проверить нашу способность воспринимать разность времен прихода двух звуков. Для этого опыта подойдет любой источник резких щелчков, заключенный в звуконепроницаемый ящик так, чтобы звук доходил до испытуемого только по трубкам.

ственно распознаем, что щелчок пришел сбоку, не имея никакого представления о том, как мы это делаем. Аналогичным образом слепые приучаются ожидать при некоторых условиях столкновения с препятствиями, обычно не отдавая себе отчета в том, что такие условия — это наличие слышимых эхо. Распознав близость препятствия и зная по опыту боль, вызываемую столкновением с ним, слепой приходит к убеждению, что он почувствовал приближение к препятствию своими руками или лицом. Все это еще раз подтверждает сделанное нами предупреждение, что нельзя слишком поспешно делать выводы о действии наших органов чувств или мозга; они могут действовать совсем не так, как нам покажется с первого раза. Не следует, однако, вдаваться и в другую крайность и считать, что измерительные приборы всегда дают более правильные результаты, чем наши невооруженные органы чувств. Как мы видели, органы

чувств и мозг людей, дельфинов, летучих мышей и водяных жуков преодолевают труднейшие задачи обнаружения и различения.

Возвращаясь к проблеме ориентировки слепых, заключаем, что они, несомненно, пользуются методом эхолокации при своем умелом передвижении «в темноте». Но получив ответ на этот общий вопрос, мы немедленно должны задать новый: какого рода звуки могут дать слепому человеку эхо, наилучшим образом осведомляющее его об окружающей обстановке? Шипящий шум с его широким диапазоном частот оказался эффективнее, чем чистые тоны в окончательных опытах Супы, Котцина и Далленбаха, когда громкоговоритель и микрофон устанавливались на тележке, подъезжавшей к препятствию. Но среднее расстояние обнаружения оказывалось сниженным до 3,75 фута вместо 6,9 фута. Означает ли это, что звук шагов эффективнее для интересующей нас цели, или что удаленному слушателю было труднее управлять тележкой с микрофоном и громкоговорителем? Из опытов, описанных в главах 2 и 3, бесспорно следовало, что некоторые звуки дают более выгодные эхо, чем другие, и что более короткий резкий щелчок обладает тем преимуществом, что он заканчивается еще до прихода первого эхо. Но звуки шагов по полу, даже при жестких подошвах ботинок, нельзя считать особенно резкими щелчками. Некоторые слепые предпочитают обувь с металлическими пластинками на каблуках, быть может, благодаря получающемуся более резкому звуку шагов. Если вы, рядовой начинающий экспериментатор, можете обнаруживать деревья при помощи хлопушки вроде той, что изображена на рис. 7, то для вас должно быть ясно, что слепой, приобретая опыт, может добиться во всяком случае не меньшего. Многие слепые так или иначе пользуются источниками резких звуков, помимо металлических пластинок на каблуках: тросточки, служащие им для расширения пределов действия рук, служат одновременно источником резкого звука при постукивании о землю или мостовую. Эти удары дают стандартные звуки, эхо которых используется слепыми для ориентировки.

Но естественно задать вопрос, являются ли звуки шагов, постукивания палкой о землю или даже щелчки игрушечных хлопушек, помещенных в рупоре, наиболее подходящими для ориентировки слепых людей? Создают ли они эхо, дающее наибольшее количество сведений, или существуют более эффективные звуки? Такой вопрос легко поставить, но

поиски убедительного ответа оказались очень трудными и полными разочарований. Было построено и испытано много хлопушек и других портативных источников звуков. Некоторые источники, особенно дающие направленный звук, широко применялись несколькими слепыми, в том числе изобретателями этих источников звуков. Однако результаты получились далеко не удовлетворительные, и многие нашли, что очень трудно услышать надежное эхо или получить добавочную помощь в ориентировке, искупающую неудобство, испытываемое ими от заметного для всех слышимого звука, привлекающего внимание к их недостатку. Между тем всякий объект, обнаружение которого желательно для слепого, так или иначе взаимодействует со слышимыми звуковыми волнами. А если это так, то почему же мы не можем придумать такой характер звука, который давал бы слышимое эхо, распознаваемое слепым, как исходящее от искомого предмета?

В опыте с обратным проигрыванием магнитофонной записи щелчков и других резких звуков уже указывалось на одну трудность. Этот опыт продемонстрировал эффективность нашего врожденного механизма подавления, снижающего слышимость эхо вследствие временной потери чувствительности уха после восприятия громкого звука. При обратном проигрывании записи множество эхо слышны перед громким исходным звуком, например резким щелчком или пистолетным выстрелом, но когда они следуют за более громким звуком, как это и бывает в действительности, то мы их совершенно не замечаем. Не в этом ли кроется главная причина того, что слепые получают от эхо меньше сведений, нежели это теоретически возможно? Если это так, то нельзя ли разработать какое-нибудь устройство, преодолевающее это затруднение? Ответа на все эти вопросы никто еще пока дать не может, и здесь снова подтверждается избитая истина, что ни одну область науки нельзя считать полностью исследованной или законченной. Быть может, у кого-нибудь из читателей возникнут новые идеи и он найдет возможным добиться новых успехов в решении задачи ориентировки слепых людей. Только потому, что пока еще не удалось найти такого решения, не следует отказываться от новых попыток, особенно когда возможная польза для блага человека так велика.

---

Цена 18 коп.

В 1938 году Дональд Р. Гриффин, в то время студент старшего курса Гарвардского университета в США, принес целую клетку летучих мышей в здание физического факультета. Здесь, в одной из первых лабораторий по изучению ультразвука, ему впервые удалось обнаружить высокочастотные звуковые сигналы, издаваемые летучими мышами при слепом полете. Этот опыт положил начало изучению механизмов ориентировки в темноте у различных животных: летучих мышей, дельфинов, водяных жуков. Выяснилось, что они испускают ультразвуковые волны и воспринимают эхо, предупреждающее их о встречаемых препятствиях или о близкой добыче. Эти сведения вместе с теорией и опытом применения радара и сонара, быть может, откроют возможности использования эхо для облегчения ориентировки слепых.

Начавши свои работы по биофизике с изучения летучих мышей, Д. Гриффин занялся в дальнейшем проблемой дальних перелетов птиц. Он выучился управлять самолетом и прослеживал с воздуха пути, выбираемые птицами при их возвращении к гнезду с больших расстояний. Кроме того, он изучал способность глаза человека воспринимать инфракрасный свет, а также применил биофизический подход к разработке телефонов и микрофонов и обогреваемой одежды для летчиков. По мнению Д. Гриффина, решение биофизических проблем существенно расширяет горизонт физика.