

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

ИНСТИТУТ ЭВОЛЮЦИОННОЙ МОРФОЛОГИИ
И ЭКОЛОГИИ ЖИВОТНЫХ им. А. Н. СЕВЕРЦОВА

НОВОЕ В ИЗУЧЕНИИ КИТООБРАЗНЫХ И ЛАСТОНОГИХ

(отдельный оттиск)

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»

МОСКВА 1978

ПРОБЛЕМЫ ИЗУЧЕНИЯ АКУСТИКИ И ГИДРОДИНАМИКИ МОРСКИХ МЛЕКОПИТАЮЩИХ

Е. В. РОМАНЕНКО

*Институт эволюционной морфологии и экологии животных
им. А. Н. Северцова АН СССР, Москва*

Акустика и гидродинамика морских млекопитающих — наиболее важные и интересные в научном отношении аспекты исследования их жизнедеятельности. Специфические условия существования китообразных и ластоногих привели к развитию у них исключительных акустических и гидродинамических способностей, изучение которых может оказаться весьма полезным для некоторых практических проблем. К настоящему времени уже накопился значительный объем сведений по указанным вопросам и, по-видимому, настала пора подвести некоторые итоги и наметить наиболее перспективные направления исследований.

Прежде всего рассмотрим акустические проблемы. Морские млекопитающие используют звуки в целях локации, ориентации, коммуникации и, возможно, навигации. Лучше всего изучены звуки зубатых китов, особенно дельфинов. Хуже — звуки усатых китов и ластоногих. В настоящее время заканчивается период феноменологических исследований эхолокационных способностей дельфинов. Накопленный фактический материал позволяет перейти к физическому и математическому моделированию механизмов эхолокации.

Можно отметить несколько направлений в исследовании акустики дельфинов:

1. Механизм излучения звука.
2. Формирование направленности.
3. Распознавание звуковых образов.
4. Прием звука.
5. Адаптация эхолокационной системы к внешним условиям.
6. Помехозащищенность эхолокационного аппарата.
7. Коммуникационная способность.

Остановимся кратко на состоянии и перспективах исследований по каждому направлению.

Существуют две точки зрения относительно локализации источника звука (Evans, 1973). Одна из них сводится к тому, что источник звука локализован в области надчерепных воздухоносных путей. Другая — к тому, что источник находится в области гортани. В пользу первой точки зрения говорят многие факты, полученные в последние годы в результате анализа большого

количества данных о пространственной и временной структуре эхолокационных сигналов. Вот некоторые из таких фактов: одновременное и независимое излучение нескольких типов звуков (импульсных и свистовых), значительно различающихся по временным и спектральным характеристикам (Lilly, Miller, 1961; Марков и др., 1974), отсутствие излучения звука в области пространства, прилегающего к гортани, при наличии активного звукоизлучения в области лобной подушки (Романенко, 1974).

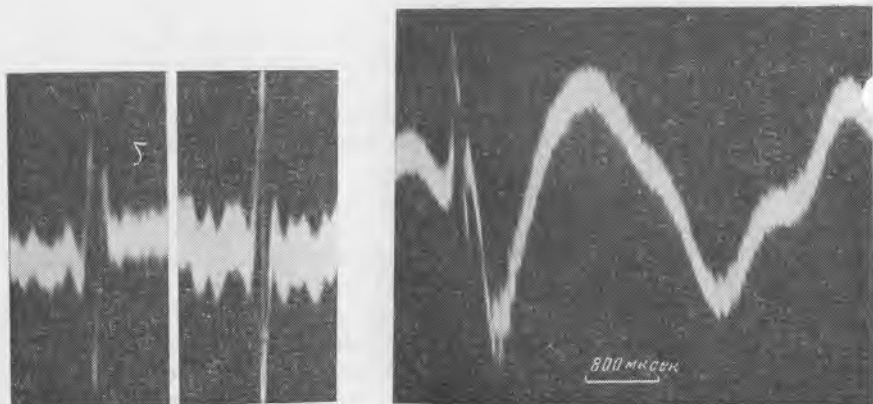
Наиболее вероятными источниками импульсного звука являются трубчатые мешки (точнее даже, правый трубчатый мешок). Однако факты одновременного и независимого излучения нескольких серий импульсов заставляют думать о том, что правый трубчатый мешок — не единственный источник звуковых импульсов.

В пользу второй точки зрения говорят лишь некоторые морфологические данные (Айрапетянц, Константинов, 1974; Яблоков и др., 1972).

Механизм излучения звуков дельфинами, по мнению большинства исследователей, является пневматическим. По-видимому, излучение эхолокационных импульсов происходит при кратковременном вдувании порций воздуха в сильно деформированный воздушный мешок (или мешки) или при резких сжатиях мышц, окружающих мешок. Именно такой механизм позволяет дельфину излучать эхолокационные импульсы, показанные на рис. 1. Эти импульсы зарегистрированы на голове дельфина при его свободном плавании в бассейне при помощи автономной и широкополосной (до 120 кГц) регистрирующей аппаратуры, закрепленной на самом дельфине (Романенко, 1973, 1974).

Рис. 1. Стандартные импульсы, излучаемые источником звука дельфина

Рис. 2. Низкочастотный импульс дельфина



Излучение низкочастотных импульсов (рис. 2) осуществляется, по-видимому, слаборезонансной колебательной системой. Механизм может быть тем же самым, но воздушный мешок должен быть больших размеров и менее деформирован. Излучение таких импульсов вполне может осуществляться вестибулярными и премаксиллярными мешками. Вывод о пневматическом механизме излучения эхолокационных импульсов подтверждается недавними экспериментами (Романенко, 1975), в которых проводилась одновременная регистрация звуков внутри дыхательной системы (в правой хоане) и снаружи (на лобной подушке).

При этом установлено, что снаружи четко прослушивается эхолокация, тогда как внутри дыхательной системы слышны свистящие звуки несомненно аэродинамического происхождения, совпадающие по времени с эхолокацией и сопровождающие, по-видимому, процесс передувания воздуха из одних воздушных полостей в другие. Эхолокация при этом внутри дыхательной системы либо не слышна совсем, либо прослушивается слабее, чем снаружи.

Вероятный механизм излучения свистовых звуков — резонансное возбуждение воздушным потоком преимущественно цилиндрических областей в системе надчерепных воздухоносных путей. Об этом свидетельствуют спектры свистовых звуков (Романенко, 1974а, б).

Кратко резюмируя все сказанное о механизме излучения звука дельфинами, следует признать, что, несмотря на значительный фактический материал, накопленный исследователями, вопрос о механизме излучения еще далеко не решен. Необходимо изыскивать нетравмирующие способы проникновения внутрь излучающих структур, наблюдения за их работой в условиях нормальной жизнедеятельности животного. По-видимому, это кратчайший путь к решению вопроса. Необходимым дополнением к нему должно служить моделирование (физическое и математическое) предполагаемых механизмов.

Полнее всего изучен механизм формирования направленности эхолокационных импульсов. Получены диаграммы направленности излучения дельфинов (Norris, Evans, 1967; Заславский, 1975), выяснена роль черепа и лобной подушки в формировании направленности (Романенко, 1964; Заславский, 1974). Высказывается предположение о том, что дельфин может осуществлять сканирование диаграммой направленности (Резников, 1970). Однако эти данные требуют подтверждения.

Еще не до конца решен вопрос о формировании эхолокационных импульсов, распространяющихся в направлении лоцируемого объекта, из излучаемых звуковых импульсов, форма которых довольно стереотипна. Правда, в этом направлении уже достигнуты определенные успехи. Зарегистрированы импульсы, которые могут считаться элементарными (Романенко, 1972, 1973, 1974), предложены гипотезы, объясняющие процесс «конструирования»

эхолокационных импульсов из элементарных (Романенко, 1974; Заславский, 1975).

Одним из самых интересных вопросов при изучении эхолокационной способности дельфинов является вопрос о том, могут ли они различать предметы под водой, и если могут, то по каким признакам. По этому вопросу в последние годы обнаружено много интересного. Оказалось, что дельфин может различать искусственные мишени (шары, диски, цилиндры) не только по интенсивности отраженных от них эхосигналов, но и по структуре так называемого вторичного эха. Предположение о возможности использования дельфином вторичного эха для получения информации об окружающем пространстве было высказано Норрисом (Norris, 1966). Дубровский с сотрудниками (Дубровский и др., 1970) экспериментально доказали это на примере распознавания афалиной искусственных шаровых мишеней. Вторичным эхосигналом называют сигнал, который излучает мишень, возбужденная ударом звуков импульса. Этот вторичный сигнал мишени может заметно отличаться по спектру от излученного дельфиньего сигнала. Спектр вторичного эхосигнала мишени однозначно определяется ее размерами и упругими свойствами материала, из которого она сделана. Правда, неясно, пользуется ли дельфин этим свойством предметов (переизлучать звуковой сигнал) в естественных условиях, где преобладают предметы неправильной формы. Пока ясно только одно, что дельфин в результате тренировки может научиться различать мишени геометрически правильных форм описанным выше способом.

Наименее изученным является вопрос о механизме приема звуковых сигналов дельфинами. Норрис считает (Norris, 1968), что высокочастотные звуки могут проникать к внутреннему уху дельфина не через слуховой проход, а через четыре чувствительные точки, находящиеся на голове дельфина. Две из этих точек находятся по бокам лобного выступа, а две другие — по бокам нижней челюсти. От чувствительных точек к внутреннему уху идут жировые каналы, которые, по мнению Норриса, могут служить волноводами. Звуки низких частот, по мнению Норриса, могут проникать к внутреннему уху как через наружный слуховой проход, так и через ткани головы.

Интересная гипотеза предложена Резниковым (1971). Он считает, что дельфин обладает своего рода «звуковидением». По его мнению, лобная подушка и череп служат для формирования диаграмм направленности не только излучаемого, но и принимаемого сигнала, фокусируя отраженные от окружающих предметов звуки на поверхность воздушных мешков и создавая звуковое изображение окружающего пространства.

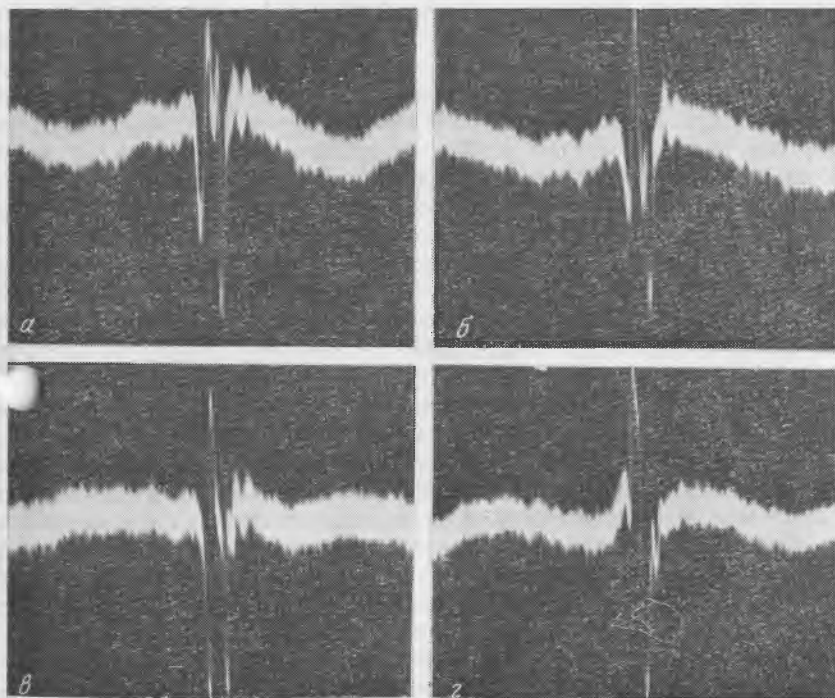
Однако эта гипотеза воспринимается весьма скептически. В частности, Гриффитс (1971) на основании теоретического анализа сонарных систем применительно к живым организмам делает следующий вывод: «Маловероятно, чтобы животные, использующие

звуковую локацию для ориентации, применяли бы какой-либо механизм формирования изображения, подобный сетчатке».

Существует еще одна гипотеза. Ее предложил Дреер (Drecher, 1969), который считает, что у дельфинов может иметь место голографический механизм приема звуковых сигналов. Однако эта гипотеза представляется наименее вероятной, поэтому мы не будем на ней подробно останавливаться.

При всем многообразии гипотез о механизме приема наиболее вероятной все-таки представляется простейшая из них: дельфины, как и все млекопитающие, слышат ушами, т. е. звуки всех частот проникают к внутреннему уху через область наружного слухового прохода и прилегающих к нему тканей. По мнению Липатова (1977), слуховой проход играет важную роль в трансформации звукового давления. В 1975 г. нами был проделан простой эксперимент, подтвердивший эту простейшую гипотезу (Романенко, 1975). Локальные источники интенсивного шума закреплялись в различных точках на голове афалины и изучалась двигательная и акустическая реакции дельфина на включение шума в процессе выполнения им эхолокационной задачи при свободном плавании.

Рис. 3. Эхолокационные импульсы дельфина из одной и той же серии (а — г)



Установлено, что наиболее четкая двигательная и акустическая реакция проявляется в тех случаях, когда два излучателя шума были закреплены у наружных слуховых проходов. Под акустической реакцией здесь имеется в виду изменение режима излучения дельфином эхолокационных импульсов после включения шума. В тех же случаях, когда излучатели шума были закреплены на нижних челюстях и лобной подушке, реакции дельфина практически не наблюдалось. Уровень шума у поверхности излучателя составлял около 120 ± 6 дБ. Спектр шума был постоянный в диапазоне частот 5—30 кГц, выше по частоте — спадающий по закону 6—8 дБ на октаву. Излучателями служили сферы из пьезо-керамики диаметром 3 см, покрытые слоем замазки из сплава воска и канифоли толщиной 3 мм.

Несколько слов об адаптационной способности эхолокационного аппарата дельфинов. Могут ли дельфины «сознательно» (целенаправленно) изменять параметры импульсов при изменении условий эхолокации? В некоторых работах (Заславский, 1975; Дубровский, 1975) высказывается утверждение, что дельфины при выполнении определенной эхолокационной задачи могут изменять лишь интенсивность, частоту следования, но не могут изменять форму и спектр импульсов.

Однако некоторые факты свидетельствуют о том, что форма импульсов даже в пределах одной серии не остается неизменной, «стереотипной». На рис. 3 приведены импульсы из одной серии. Видно, что форма их не одинакова. Более того, воздействие широкополосной шумовой помехи непосредственно на область наружных слуховых проходов приводит к тому, что дельфин в процессе эхолокации довольно быстро и заметно перестраивает спектр импульсов, значительно сужая его (за время около 200—300 мсек после включения шума). Способность дельфинов изменять спектр эхолокационных сигналов отмечалась и ранее в экспериментах по изучению помехоустойчивости эхолокационной системы (Абрамов и др., 1971; Бабкин, Дубровский, 1971). В этих экспериментах шумовой фон создавался в водоеме, в котором плавал дельфин.

Анализируя помехоустойчивость эхолокационной системы дельфинов, нельзя не упомянуть о механизме защиты органа слуха дельфина от его собственных интенсивных эхолокационных импульсов. Дело в том, что дельфины способны излучать звуки, интенсивность которых порядка 10^4 — 10^{-3} Вт/см² (Романенко, 1964; Голубков и др., 1972). Очевидно, что орган слуха должен быть как-то защищен от перегрузки такими звуками. Защита слуха может осуществляться, по-видимому, двумя способами: загрублением чувствительности слуха в момент излучения импульсов и экранировкой органов слуха. Первое предположение проверить трудно, а второе — сравнительно легко. Для этого необходимо измерить уровень звука в окрестности слуховых органов и сравнить с уровнем того же звука в области локационного аппарата. Именно такой эксперимент был проделан на афалине

(Романенко, 1974). Измерения проводились при помощи автономной измерительной аппаратуры, закрепляемой на дельфине одновременно в окрестности наружного слухового прохода и на лобной подушке, в процессе выполнения дельфином эхолокационной задачи при свободном плавании в бассейне.

Оказалось, что звуковые импульсы, излучаемые эхолокационным аппаратом дельфина, доходят до области наружного слухового прохода значительно ослабленными (на 35—40 дБ). Свистовые звуки при этом ослабляются примерно на 20 дБ. Экранировка органа слуха осуществляется устройством черепа и системой надчерепных воздухоносных путей.

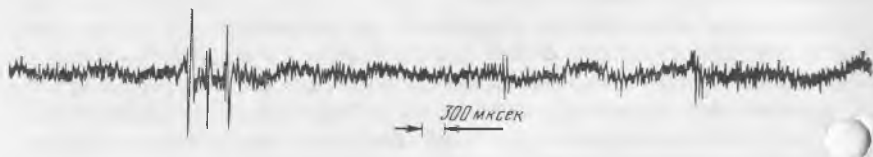
Есть одна особенность поведения китообразных, которая уже много лет представляет собой загадку для ученых. Речь идет о случаях гибели китообразных на мелководье. Иногда эти случаи носят массовый характер, причем гибнут зачастую представители разных китов с хорошо развитой системой эхолокации. Общепринятое объяснение этого явления сводится к предположению о нарушении нормальной работы эхолокатора на мелководье. Считается, что эхолокатор китообразных не способен обнаружить мелководье, в котором звук затухает.

Простейшее рассмотрение этого явления в рамках геометрической акустики как будто подтверждает справедливость такого предположения. Однако в последнее время появились данные, которые ставят под сомнение изложенную выше гипотезу и позволяют дать иное, по-видимому, более обоснованное объяснение описанного явления.

Эти данные позволили получить методика регистрации звука непосредственно на голове дельфина (Романенко, 1974). Регистрация звука на голове свободно плавающего дельфина позволила узнать, что же слышит дельфин, находясь под водой и, в частности, на мелководье, может ли он обнаружить приближение к мелководью и само мелководье. Для того чтобы узнать именно то, что слышит дельфин, гидрофон закрепляли вблизи его наружного слухового прохода. В этом случае гидрофон регистрирует как излучаемые дельфином эхолокационные импульсы, так и эхосигналы, отраженные от окружающих объектов. На рис. 4 показана группа импульсов, из которых импульс № 1 является излученным, импульсы № 2 и 3 — отраженными от дна водоема и поверхности воды соответственно, импульс № 4 — эхосигнал от предъявленной дельфину рыбы. Дельфин плавал в водоеме глубиной 1 м. Такие группы импульсов (как на рис. 4) являются характерными для случаев плавания дельфина на мелководье. Именно такой набор отраженных импульсов сопутствует каждому излученному импульсу эхолокационной серии. Изменяются только временные интервалы между импульсами в зависимости от глубины водоема, положения дельфина между дном и поверхностью воды, расстояния его от окружающих и предъявляемых предметов. Легко заметить, что, несмотря на высокую на-

правленность излучения эхолокационных импульсов дельфином, доля энергии импульсов, излучаемых вверх и вниз, еще достаточно высока, чтобы обеспечить четкие эхосигналы от дна и поверхности воды. Во всяком случае при глубине водоема 1 м они намного превышают эхосигналы от предъявленной рыбы (ставрида длиной 25 см), что позволяет сделать вывод о способности дельфинов обнаруживать мелководье с глубиной воды порядка

Рис. 4. Акустическая картина в области наружного слухового прохода дельфина



нескольких метров. Такие глубины едва ли им опасны. Приведенные предварительные данные позволяют усомниться в гипотезе о неспособности китообразных обнаруживать мелководье при помощи эхолокатора, но не дают объяснения приведенным выше фактам гибели китообразных на мелководье. Однако есть данные, которые объясняют и эти факты. По этим данным, причиной гибели может быть болезнь. Как показывали многочисленные наблюдения за поведением больных афалин в неволе (Романенко, 1974), приблизительно за 40 мин. до смерти больной дельфин сам выплывает на мелководье, так как уже не способен держаться на плаву. При этом даже дикий дельфин теряет осторожность и пугливость. Он уже не реагирует на приближение к нему человека, в отличие от здорового животного. В частности, именно болезнью можно объяснить случаи появления дельфинов на пляжах, а не желанием пообщаться с человеком, как утверждают некоторые. Случаи массовой гибели животных на мелководье можно объяснить эпидемией. Совершенно исключать возможность эпидемических заболеваний животных в океане, по-видимому, нельзя. Мы еще очень мало знаем о болезнях китообразных. Во всяком случае при содержании дельфинов в условиях неволи мы имеем возможность однажды наблюдать случай эпидемии рожи в группе афалин. В результате этого заболевания большая часть группы дельфинов погибла в течение короткого времени. Не исключена также, по-видимому, возможность массового заболевания китообразных пневмонией после сильных штормов в результате попадания воды в легкие.

При изучении коммуникационных звуков животных необходимо прежде всего определить наше отношение к ним. Животные, несомненно, используют звук, чтобы повлиять на поведение других животных существ. Однако отождествлять звуки животных с

человеческой речью пока нет никаких оснований. Поэтому термины «язык», «слово», «словарный состав» и т. п. мы будем использовать без всякого намека на антропоморфизм или сходство с человеческой речью.

В последние годы исследователи стали уделять большое внимание вопросам связи и возможного обмена информацией у китообразных. Считается, что типично коммуникационными сигналами у дельфинов являются свисты. Однако высказываются предположения, что к коммуникационным сигналам могут быть отнесены также некоторые импульсные низкочастотные сигналы, криканы, лай и др. При этом возможно наличие в конструкции сигналов минимум двух уровней организации (Марков и др., 1974).

Очень ценная работа по изучению коммуникационных сигналов дельфинов была проведена Дреером и Эвансом, которые провели длительные и многочисленные наблюдения за поведением животных в плену и на свободе. Они классифицировали все зарегистрированные сигналы по частоте их использования дельфинами и попытались связать их с поведением дельфинов в определенных ситуациях.

В общий «словарь» четырех видов китообразных Дреер включил 32 различных сигнала. Причем из них только пять используются всеми животными, три были использованы всеми, кроме гринд, шесть использовались двумя видами.

Таким образом, имеющиеся данные свидетельствуют о том, что дельфиний «язык» довольно богат. Однако отсюда не следует, что он может быть признан языком в полном смысле этого слова.

На данном этапе, пока мы располагаем лишь самыми предварительными сведениями о «языке» дельфинов, по-видимому, следует быть осторожными в оценке его возможностей и уровня развития.

Что же касается излучения свистовых сигналов дельфинами, то, как уже отмечалось выше, он несомненно является резонансным. Созданная математическая модель (Романенко, 1974) позволяет объяснить некоторые особенности механизма излучения. Однако до полного решения вопроса еще, по-видимому, далеко.

Среди зубатых китов не только дельфины отличаются «разговорчивостью». Кашалоты издают характерные «стандартные пакки» импульсов (по 6—9 импульсов длительностью от 0,1 до 2 мсек каждый с общим временем излучения «пакки» около 24 мсек).

У косатки импульсы очень характерны присутствием узкополосных составляющих (250—500 Гц). Импульсы излучаются сериями по 10—15 в каждой.

Звуки, издаваемые усатыми китами (*Mystacoceti*), значительно более низкочастотны, чем звуки зубатых китов. Их спектр простирается примерно от 20 до 1000 Гц. Изучены они существенно хуже, чем звуки зубатых китов (Яблоков и др., 1972).

Ластоногие так же, как и китообразные, приспособлены к водному образу жизни. По-видимому, звук в их жизни должен иметь столь же важное значение, что и у китообразных, поскольку эти животные с успехом обитают в темных и мутных водах. Полтер (Poulter, 1963a) длительное время наблюдал за поведением слепых морских львов и показал, что оно ничем не отличается от поведения животных с нормальным зрением. Более того, им обнаружены звуки морских львов, которые вполне могли бы служить целям эхолокации (Poulter, 1963a,b).

Обнаружены звуки и у других ластоногих: обыкновенного тюленя, морского слона, сивуча (Schaver, Poulter, 1967; Айрапетьянц, Константинов, 1974).

Немногочисленные исследования биоакустики свидетельствуют о том, что ластоногие являются перспективным объектом исследования. Они более доступны, чем китообразные, и, по-видимому, более удобны в эксперименте. Однако изучению акустики ластоногих уделяется пока еще мало внимания.

Практически ничего не известно об использовании морскими млекопитающими звуков в целях навигации. Таким образом, еще многие проблемы акустики млекопитающих ждут своего решения.

Теперь о гидродинамике морских млекопитающих. Проблема гидродинамики китообразных, в частности дельфинов, является одной из самых важных и трудных из числа проблем, связанных с жизнедеятельностью животных. Достаточно напомнить, что она сформулирована более 40 лет назад английским зоологом Джеймсом Греем (Gray, 1936) и с тех пор без существенных изменений и практически безуспешно обсуждается в мировой научной литературе. Сущность проблемы заключается в том, что дельфинам (а также некоторым быстроходным рыбам) приписывается необъяснимая способность двигаться под водой с такими большими скоростями, которые не могут быть обеспечены их запасом мускульной энергии в предположении турбулентного их обтекания. Этот так называемый парадокс Грея сыграл свою положительную роль в науке, привлекая внимание ученых к проблемам гидродинамики животных. Был предложен ряд гипотез для объяснения парадокса. При этом авторы гипотез исходили, во-первых, из несомненного существования парадокса, во-вторых, из необходимости ламинарного обтекания дельфинов при сверхкритических числах Рейнольдса как единственном возможном объяснении парадокса. Но, несмотря на то что «парадокс Грея» сформулирован очень давно, до сих пор не доказано его существование, так как очень трудно правильно оценить удельную мощность мускулов животных.

Характерной особенностью подавляющего большинства проводившихся до сих пор исследований гидродинамики дельфинов является то, что в них осуществляется поиск возможных механизмов сохранения ламинарного обтекания дельфинов при сверхкритических числах Рейнольдса. Так появились гипотезы Грея (Gray, 1936) о наличии отрицательного градиента давления вдоль

тела активно плывущего дельфина и его стабилизирующей роли, Крамера (Kramer, 1960) о демпфирующих свойствах кожи дельфинов, Меркулова (1967) о «бегущей волне» на теле дельфина и др. При этом совершенно недостаточно уделялось внимания изучению истинного характера обтекания дельфинов, оно априори считалось ламинарным. Это и понятно, так как такие исследования предполагают постановку весьма сложных и тонких экспериментов по изучению структуры пограничного слоя дельфина. Еще каких-нибудь 10—15 лет назад такие измерения были просто невозможны, не позволял уровень развития микроэлектроники. Сейчас же такие измерения возможны и уже проводятся. Первые результаты оказались неожиданными (Романенко, 1972; Романенко, Янов, 1973; Козлов, Шакало, 1973): обтекание дельфинов при сверхкритических числах Рейнольдса оказалось не ламинарным, а «почти» турбулентным. Причем степень турбулентного пограничного слоя зависит от того, движется ли дельфин по инерции (пассивно) или активно совершает колебательные движения телом, создавая тяговое усилие. В первом случае (движение по инерции) обтекание дельфина является чисто турбулентным, во втором случае уровень турбулентности приблизительно в 2 раза ниже, чем при движении по инерции. Из этого с несомненностью следует вывод о том, что при пассивном движении дельфина (по инерции) никакие механизмы ламинаризации не действуют. При активном же движении действуют некоторые механизмы, препятствующие полному переходу ламинарного обтекания в турбулентное или, что более вероятно, способствующие частичному обратному переходу турбулентного обтекания в ламинарное. Большая вероятность последнего заключения следует из факта нестационарности плавания дельфина, при котором участки разгона сменяются участками движения по инерции с замедлением, которые, в свою очередь, вновь сменяются участками разгона и т. д. На каждом участке движения по инерции при сверхкритических числах Рейнольдса на дельфине развивается турбулентный пограничный слой. При переходе к активному режиму движения уровень турбулентности значительно уменьшается, турбулентный пограничный слой как бы частично ламинаризируется, наблюдается тенденция к обратному переходу турбулентного пограничного слоя в ламинарный.

Такой вывод заставляет совсем по-иному взглянуть на существующие гипотезы, которые исходят не из частичной ламинаризации турбулентного обтекания, а из стабилизации первоначально ламинарного обтекания. Большинство гипотез никак не связывает механизм стабилизации ламинарного обтекания со степенью активности плывущего дельфина. Есть лишь одна гипотеза, которая придает большое значение активности плывущего дельфина. Это уже упоминавшаяся выше гипотеза Грея. Сущность ее заключается в следующем. Известно, что при плавании дельфинов (то же относится и к рыбам) тяга создается с помощью колеба-

тельного движения тела, которое может быть аппроксимировано изгибной волной, бегущей от головы к хвосту с нарастающей амплитудой. При этом массы жидкости отбрасываются назад, что приводит к понижению давления в хвостовой части тела дельфина (или рыбы) и созданию отрицательного градиента давления вдоль тела. Жидкость из окружающего пространства, в том числе и из областей, непосредственно примыкающих к телу, устремляется с ускорением в зону пониженного давления. Происходит своеобразное отсасывание пограничного слоя. Это иллюстрируется рис. 5, взятым из работы Грея. По мнению Грея, такое ускорение



Рис. 5. Схема обтекания тела дельфина (по Грею)

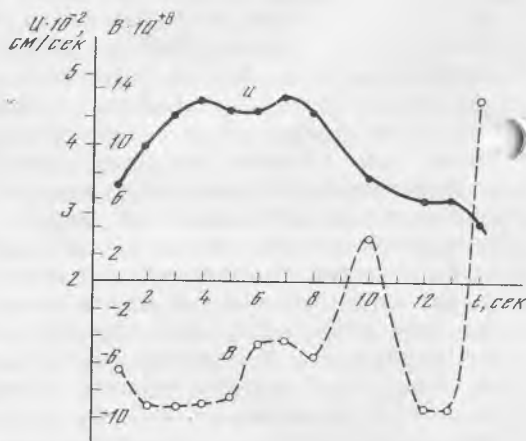


Рис. 6. Зависимость скорости движения дельфина и параметра B , характеризующего градиент давления, от времени

потока жидкости вдоль тела дельфина должно приводить к сохранению ламинарного обтекания при сверхкритических числах Рейнольдса. Но, как мы уже видели, ламинарное обтекание дельфинов при сверхкритических числах Рейнольдса не сохраняется. Эксперименты свидетельствуют о значительной степени турбулентности в пограничном слое. Тем не менее отрицательный градиент давления может быть той причиной, которая приводит к частичной ламинаризации турбулизированного пограничного слоя на участках активного движения дельфина. Действительно, экспериментами в аэро- и гидродинамических трубах показано (Репик, 1970; Назарчук и др., 1974), что отрицательный градиент давления достаточной величины может привести к обратному переходу турбулентного течения в ламинарное. При этом критерием воздействия на течение выбран не сам отрицательный градиент давления, а некоторый формпараметр, составной частью которого является отрицательный градиент давления. Полный обратный переход турбулентного режима течения в ламинарный осуществляется при значении формпараметра

$$B = \frac{Bv}{\rho U} \cdot \frac{dp}{dx} \approx -3 \cdot 10^{-6},$$

где U — скорость потока на границе пограничного слоя, $\frac{dp}{dx}$ — градиент давления, ρ — плотность среды, ν — вязкость. При меньших по абсолютной величине значениях формпараметра полного обратного перехода не происходит, но наблюдаются значительные изменения в структуре течения, хотя пограничный слой остается существенно турбулентным.

Теперь остается только выяснить, действительно ли вдоль тела активно плывущего дельфина устанавливается отрицательный градиент давления или это лишь безосновательное предположение Грея.

На рис. 6 показана экспериментальная зависимость скорости движения дельфина U и параметра, характеризующего градиент давления B от времени. Как видно, градиент давления действительно существует, причем он имеет отрицательный знак при движении дельфина с ускорением или постоянной скоростью и становится положительным при движении дельфина с замедлением. При этом в моменты наибольшего ускорения дельфина формпараметр B достигает величины $-0,1 \cdot 10^{-6}$, что недостаточно для полного перехода турбулентного обтекания в ламинарное, но, по-видимому, достаточно для существенного (приблизительно в 2 раза) уменьшения уровня пульсаций давления, о чем свидетельствуют результаты упоминавшихся экспериментов (Романенко, 1972, и др.). На рис. 7 приведены эти результаты.

Таким образом, подводя некоторые итоги, можно, по-видимому, сделать вывод о том, что коль скоро обтекание дельфина в значительной степени турбулизовано (а сомневаться в этом уже не приходится), то едва ли целесообразно тратить силы на поиски механизмов стабилизации ламинарного обтекания. Следует обратить пристальное внимание на принципиальную возможность обратного перехода турбулентного обтекания дельфина в ламинаризованное и на факторы, способствующие этому, в первую очередь — на отрицательный градиент давления. В связи с этим следует всемерно развивать и совершенствовать технику автономных измерений в пограничном слое дельфина, так как только прямые измерения позволят однозначно разрешить «парадокс Грея». Гидродинамика ластоногих имеет свои особенности. Их кожа имеет волосной покров, который существенно влияет на характер их обтекания. Высказывается также мысль (В. Е. Соколов), что волосной покров некоторых ластоногих (например, морских котиков) может содержать и длительное время сохранять значительное количество воздуха, что может влиять на характер обтекания. Проведенные нами экспериментальные исследования тонкой структуры пограничного слоя на живых объектах (ларга, сивуч) показали, что при скорости плавания 3—4 м/сек пограничный слой значительно турбулизован, имеет толщину 12—15 мм (на расстоянии 1 м от носа животного), максимальный уровень пульсаций давления находится не вблизи тела животного,

а на расстоянии 6—9 мм от него в средней части пограничного слоя. Интересны результаты исследования характера обтекания жесткой полумодели, оклеенной шкурой байкальского тюленя (Романенко и др., 1972, 1973; Романенко, 1976). Они сводятся к следующему.

1. При сверхкритических числах Рейнольдса пограничный слой на шкуре существенно турбулизирован. При этом спектр пульсаций скорости на шкуре отличается от соответствующего спектра на чистой полумодели. Отличие состоит в том, что в интервале частот до 1—2 кГц уровень пульсаций на шкуре выше, чем на чистой полумодели приблизительно на 6 дБ. В интервале частот от 1—2 до 8—10 кГц наблюдается обратная картина: уровень пульсаций на шкуре меньше, чем на чистой полумодели на 6—8 дБ. Это иллюстрирует рис. 8. Подобное явление наблюдалось при значениях скорости потока от 5 до 15 м/сек. При более высоких значениях скорости потока спектры пульсаций скорости практически совпадают.

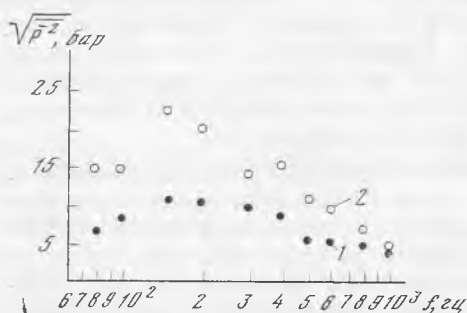
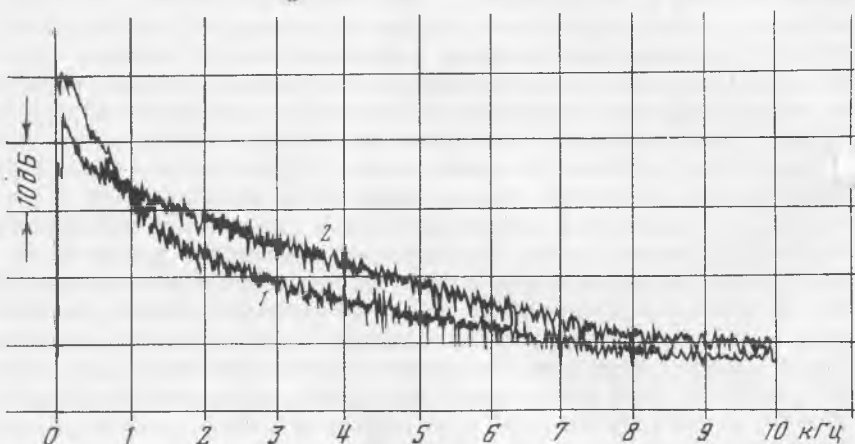


Рис. 7. Спектральная плотность среднеквадратичных пульсаций давления

1 — сильно активное движение дельфина с ускорением 3 м/сек²; 2 — пассивное движение дельфина (по инерции). Средняя скорость движения в обоих случаях равна 350 см/сек

Рис. 8. Спектры пульсаций скорости вблизи поверхности шкуры (1) и чистой полумодели (2)

Скорость потока 10 м/сек



При значениях скорости потока менее 5 м/сек измерения не проводились.

Уменьшение доли высокочастотных составляющих спектра пульсаций скорости в пограничном слое на шкуре можно объяснить теми же причинами, которые приводят к уменьшению уровня пульсаций скорости в пограничном слое при наличии полимерных добавок.

2. Толщина пограничного слоя на шкуре в точке измерения больше, чем на чистой полумодели в той же точке, почти в 2 раза. Увеличение толщины пограничного слоя на шкуре можно объяснить возмущающим действием волосяного покрова на носике полумодели, подобно тому как это происходит при наличии на носике шероховатости или турбулизатора.

3. Коэффициент сопротивления трения чистой полумодели с увеличением скорости уменьшается, а полумодели с наклеенной шкурой — увеличивается. Есть основания считать, что коэффициент сопротивления полумодели со шкурой меньше коэффициента сопротивления чистой полумодели при скорости потока до 8—10 м/сек. При более высокой скорости потока соотношение меняется на обратное.

ЛИТЕРАТУРА

- Абрамов А. П., Голубков А. Г., Королев В. И., Фрадкин В. Б. 1971. О помехозащищенности гидролокатора дельфина.— Труды Акустического ин-та, вып. 17.
- Айрапетьянц Э. Ш., Константинов А. И. 1974. Эхолокация в природе. Л., «Наука».
- Бабкин В. П., Дубровский Н. А. 1971. О дальности действия и помехоустойчивости эхолокационного аппарата дельфина афалины при обнаружении различных мишеней.— Труды Ленингр. ин-та авиац. приборостроения, вып. 76.
- Гриффитс Д. У. Р. 1971. Теория сонарных систем применительно к биологическим организмам.— В кн.: Кибернетические проблемы бионики. М., «Мир».
- Голубков А. Г., Ершова И. В., Королев В. И., Малышев Ю. А. 1972. Об энергетических параметрах локационного аппарата черноморских афалин.— Труды Ленингр. ин-та авиац. приборостроения, вып. 76.
- Дубровский Н. А. 1975. Эхолокация у дельфинов (обзор). ЦНИИ «Румб».
- Дубровский Н. А., Титов А. А., Краснов П. С., Бабкин В. П., Лекомцев В. М., Николенко Г. В. 1970. Исследование разрешающей способности эхолокационного аппарата черноморской афалины.— Труды Акустического ин-та, вып. 10.
- Заславский Г. Л. 1975. Экспериментальное исследование пространственно временной структуры эхолокационных сигналов дельфина. Канд. дис. М.
- Козлов Л. Ф., Шакало В. М. 1973. Некоторые результаты измерений пульсаций скоростей в пограничном слое дельфинов.— Бионика, № 7.
- Липатов Н. В. Функциональная роль наружного слухового прохода под водой.

- Марков В. И., Тарчевская В. А., Островская В. М. 1974. Организация акустических сигналов у черноморской афалины.— В сб.: Морфология, физиология и акустика морских млекопитающих. М., «Наука».
- Меркулов В. И. 1967. Движение вязкой несжимаемой жидкости вдоль бегущей волны.— Изв. Сиб. отд. АН СССР, Сер. техн., № 8, вып. 2.
- Назарчук М. М., Ковецкая М. М., Панченко В. Н. 1974. Обратный переход турбулентного течения в ламинарное. Киев, «Наукова думка».
- Резников А. Е. 1970. О звуковидении у дельфинов. Тез. докл. 23-й науч.-техн. конф. Ленингр. ин-та авиац. приборостроения. Л.
- Репик Е. У. 1970. Экспериментальное исследование структуры турбулентного пограничного слоя при наличии продольного градиента давления.— Труды Центр. аэрогидр. ин-та, вып. 1218.
- Романенко Е. В. 1964. О гидролокационной способности дельфинов.— Акустический журнал, т. 10, вып. 4.
- Романенко Е. В. 1972а. Ближнее акустическое поле дельфина афалины. 5-е Всес. совещ. по биол. морских млекопитающих, Махачкала.
- Романенко Е. В. 1972б. О гидродинамике рыб и дельфинов.— В науч.-техн. сб.: Морское приборостроение. Сер. Акустика, вып. 1.
- Романенко Е. В. 1973. Звуковые сигналы в ближнем поле афалины.— Зоол. журн., т. 52, вып. 11.
- Романенко Е. В. 1974. О механизме излучения некоторых импульсных и свистовых сигналов дельфином.— В сб.: Морфология, физиология и акустика морских млекопитающих. М., «Наука».
- Романенко Е. В. 1975. О слухе дельфинов.— 6-е Всес. совещ. по биол. морских млекопитающих. Киев.
- Романенко Е. В. 1976. Основы статистической биогиродинамики. М., «Наука».
- Романенко Е. В., Соколов В. Е., Калинин Н. М. 1972. Гидродинамические особенности шкуры байкальского тюленя.— 5-е Всес. совещ. по биол. морских млекопитающих. Махачкала.
- Романенко Е. В., Соколов В. Е., Калинин Н. М. 1973. Гидродинамические особенности волосяного покрова байкальского тюленя.— Зоол. журн., т. 52, вып. 10.
- Романенко Е. В., Янов В. Г. 1973. Результаты экспериментов по изучению гидродинамики дельфинов.— Бионика, № 7.
- Соколов В. Е. 1964. Экологическая морфология кожного покрова млекопитающих. Докт. дис., М.
- Яблоков А. В., Белькович В. М., Борисов В. И. 1972. Киты и дельфины. М., «Наука».
- Drecher J. 1969. Acoustical holographic model of cetacean echolocation son Acoustical holography, v. 1.
- Evans W. E. 1973. Echolocation by marine delphinids and one species of freshwater dolphin.— J. Acoust. Soc. America, v. 54, N 1.
- Kramer M. O. 1960. The dolphins secret. New Scient., v. 7, N 181.
- Gray J. 1936. Studies of animal locomotion. VI. The propulsiv powers of the dolphin.— J. Exper. Biol., v. 13, N 2.
- Lilly G. C., Miller A. M. 1961. Sounds emitted by the bottlnose delphin.— Science, v. 133, N 3465.
- Norris K. S., Evans W. E., Turner R. N. 1966. Echolocation in an Atlantic bottienose porpoise during discrimination. Animal sonar system. In: Biology and Hionics, v. 1. R. G. J. Busnel (Ed.). INRA—CNRS.

- Norris K. S., Evans W. E. 1967. Directionality of echolocation clicks in rough-tooth porpoise *Steno bredanensis* (Lesson). In *Marine Bio-acoustics*. New York, Pergamon Press.
- Norris K. S. 1968. The evolution of acoustic mechanisms in Odontocete cetaceans. *Evolution and environment*. New Haven and London, Yale Univ. Press.
- Norris K. S., Harvey G. W. 1974. Sound transmissions in the porpoise head.—*J. Acoust. Soc. America*, v. 56, N 2.
- Poulter T. C. 1963a. The sonar of the sea lion.—*IEEE Trans. Ultrasonic Engng.*, v. 10.
- Poulter T. C. 1963b. Sonar signals of the sea lion.—*Science*, v. 139.
- Schaver H. N., Poulter T. C. 1967. Scalion echoranging.—*JASA*, v. 42, N 2.
- Whitlow W. L., Eloyd R. H., Murchison A. E. 1974. Measurement of echolocation signals of the Atlantic bottlenose dolphin, *Tursiops truncatus* Montagu, in open waters.—*JASA*, v. 56, N 4.

THE PROBLEMS OF MARINE MAMMAL ACOUSTICS AND HYDRODYNAMICS

E. V. ROMANENKO

*A. N. Severtzov Institute of Evolutionary
Animal Morphology and Ecology, USSR Acad. Sci.*

SUMMARY

The main problems of echolocation, orientation and communication behaviour of cetaceans and pinnipeds are considered with reference to the hydrodynamics of these animals.

These problems are being investigated extensively both in this country and abroad. Some interesting results have been obtained: various type sound signal patterns have been studied in cetaceans as well as their formation and some mechanisms of underwater objects' identification. The techniques of hydrodynamic boundary layer fine structure studies have been developed, and the patterns of the water flowing round the animal have been revealed for some pinniped and cetacean species under free-swimming conditions.

However, some problems still call for further study. This primarily applies to the mechanisms of sound emission and adaptation of the animal's acoustic system to environmental changes, the techniques of boundary layer formation utilized by the animals under study.