

## ОСОБЕННОСТИ АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ МЕШАЮЩИХ ОТРАЖЕНИЙ И ЭХОЛОКАЦИОННЫЙ СЛУХ ДЕЛЬФИНА

© 2008 г. В.А. Рябов

Карадагский природный заповедник НАН Украины, 98188, Курортное, Феодосия, ул. Науки 24, Крым, Украина  
E-mail: ryaboff@ukr.net

Поступила в редакцию 15.02.07 г.

После доработки 18.10.07 г.

Рассмотрена модель акустического поля мешающих отражений от стальных цилиндров. Анализ модели поля показал наличие больших потенциальных возможностей для уменьшения влияния помех, возникающих в результате их интерференции, и повышения вследствие этого отношения сигнал/помеха. Рассмотрено соответствие обсуждаемых в настоящее время моделей слуха дельфина акустическому полю помех. Обсуждается гипотеза об участии подбородочных отверстий нижней челюсти в проведении эхосигналов к улитке. В этом случае апертура приема определяется размером подбородочных отверстий, а база - расстоянием между подбородочными отверстиями левой и правой половин нижней челюсти. Есть основания полагать, что оптимальные (адекватные полю помех) размеры апертуры и базы эхолокационного слуха Odontoceti существенно повышают эффективность защиты сонара от реверберации.

*Ключевые слова:* дельфин, слух, эхолокация, подбородочные каналы, отношение сигнал/мешающие отражения.

Изучению слуха зубатых китов (Odontoceti), и дельфинов в особенности, посвящены многочисленные работы. Однако в вопросе о механизмах проведения эха к внутреннему уху животных мнения исследователей расходятся и обсуждаются в основном два возможных пути.

Первый путь - проведение звука через наружные слуховые проходы и среднее ухо [1], либо через мягкие ткани головы на проксимальную часть слуховых проходов и затем на среднее ухо [2,3]. Есть также мнение, что слуховые проходы вообще не могут участвовать в проведении звука к среднему уху [4-6] или служат только для проведения низкочастотных сигналов [7-9]. На основе положения о возможности звукопроведения через наружные слуховые проходы, обсуждается также возможность существования функционально специфических подсистем пассивного (1-10 кГц) и активного (в диапазоне около 100 кГц) слуха [10].

Второй путь включает жировой тяж нижней челюсти и непосредственно барабанную кость, исключая наружные слуховые проходы и барабанную связку [5,8,11-15]. Данные, полученные в этих работах, свидетельствуют о том, что эхосигнал может передаваться в жировой тяж нижней челюсти через подбородочные отвер-

стия [11] или непосредственно через кость, в районе «акустического окна» [12,14]. По жировому тяжу звук передается на латеральную стенку барабанной кости (где ее толщина минимальна), играющую роль барабанной перепонки и передающую звуковые колебания на молоточек среднего уха [11-17]. Звуки низких частот и коммуникационные сигналы могут в этом случае передаваться на среднее ухо по наружному воронкообразному жировому телу, перекрывающему «акустическое окно» [14].

Результаты некоторых эхолокационных экспериментов свидетельствуют в пользу второго пути звукопроведения. Акустическое экранирование нижней челюсти существенно затрудняло выполнение дельфином эхолокационной задачи [18]. Область частот 40 - 140 кГц, необходимая афалине для эхолокационного различения мишеней, рассматривается как диапазон частот эхолокационной системы и эхолокационного слуха [19,20]. Спектральный максимум энергии зондирующих импульсов черноморской афалины [19,20] совпадает с частотами максимальной чувствительности слуха (110 - 120 кГц) [21,22] и частотами минимальных дифференциальных порогов слышимости [19,23]. Подобное совпадение характерно и для других видов дельфинов [24-26].

Было также показано, что акустическое стимулирование нижней челюсти возбуждает значительные вызванные потенциалы в централь-

Сокращения: ХН - характеристика направленности, ПОА - приемник с оптимальной апертурой.

ной слуховой системе дельфина [5,8]. Однако области максимальной чувствительности поверхности нижней челюсти к звукам, излучаемым контактно точечным излучателем [5,8,27-29], в разных работах различны, а полученные результаты не объясняют механизм звукопроводения.

Наряду с этим обсуждается также возможность одновременного участия и наружных слуховых проходов и «акустических окон» для передачи звука на улитку при формировании пространственного слухового образа у дельфинов [30].

Результаты моделирования процесса эхолокационного различения мишеней [31,32] также дают основание рассматривать подбородочные отверстия в качестве каналов, через которые эхо проходит в жировой тяж нижней челюсти дельфина. При этом левая и правая половины нижней челюсти рассматриваются как антенны бегущей волны [33-37]. На основании этого, морфологические структуры каждой половины нижней челюсти рассматриваются как компоненты предполагаемого специализированного периферического отдела подсистемы эхолокационного слуха.

Какая же из обсуждаемых моделей звукопроводения наиболее соответствует эхолокационному слуху дельфина? Для анализа этого вопроса в настоящей работе были учтены известные результаты, демонстрирующие тонкие способности эхолокатора дельфина при обнаружении подводных объектов в условиях реверберационных помех и свидетельствующие о высоком уровне адаптации слуха к мешающим отражениям. Реверберация представляет собой суммарный эхосигнал, вызванный зондирующим импульсом эхолокатора от объектов и неоднородностей среды. Интенсивность реверберации пропорциональна интенсивности зондирующего импульса, поэтому в обстановке, ограниченной реверберационными помехами, изменение интенсивности зондирующего импульса не улучшает отношение сигнал/помеха. Следовательно, слух дельфина должен быть согласован с акустическим полем мешающих отражений. С учетом этой предпосылки, цель работы состояла в анализе адекватности моделей слуха акустическому полю реверберационных помех. Конкретные задачи работы - разработка и изучение модели акустического поля мешающих отражений, определение возможных механизмов уменьшения их влияния, сопоставление модели поля и моделей звукопроводения.

В работе изучается поле мешающих отражений от двух объектов. Для построения модели были использованы результаты изучения эхолокационного дифференцирования дельфи-

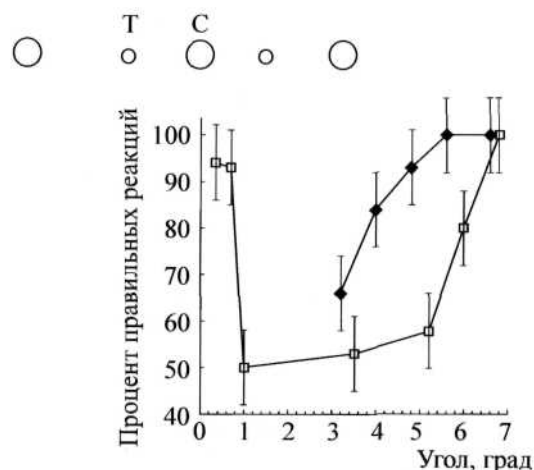


Рис. 1. Влияние центрального цилиндра (С) на эхолокационное различение дельфином шаров (Т) в зависимости от угла разнесения боковых цилиндров относительно разделительной сети [31] (в связи с симметрией рассматривается правая полуплоскость). Расположение шаров и цилиндров в горизонтальной плоскости показано вверху рисунка. Обозначения: квадраты - два цилиндра; ромбы - три цилиндра.

ном латунных шаров в условиях мешающих отражений от стальных цилиндров [31]. Было показано, что дельфин сравнивает мишени между собой в каждом испытании, и достаточно замаскировать хотя бы одну мишень, чтобы он не смог их различить. Цилиндры, расположенные между мишенями (углы меньше  $\pm 1,4^\circ$ ), не оказывают мешающего воздействия на различение, пока угловое расстояние между цилиндрами и мишенями превышает  $0,5^\circ$  (рис. 1). В этом случае способность дельфина к высокому угловому разрешению мишеней и цилиндров объясняется направленностью его локационных импульсов и слуха. Так как крутизна склонов сквозной (излучение-слух) характеристики направленности (ХН) достигает  $5 \text{ дБ}/^\circ$  и возрастает с удалением от максимума, дельфин использует склоны ХН излучения и слуха для ослабления мешающего эхосигнала. Например, для углового разрешения (левой или правой) мишени дельфин может ориентировать характеристику направленности так, чтобы эхо мишени и эхо цилиндров попадали на один (правый или левый) склон ХН. Когда же цилиндры расположены снаружи мишеней (углы больше  $\pm 1,4^\circ$ , рис. 1), дельфину необходимо использовать (и левый и правый) склоны ХН (с учетом конфигурации мишеней и цилиндров), поэтому пороговое расстояние между цилиндрами и мишенями увеличивается более чем на порядок [31].

Для усложнения задачи к двум наружным цилиндрам был добавлен третий цилиндр ме-

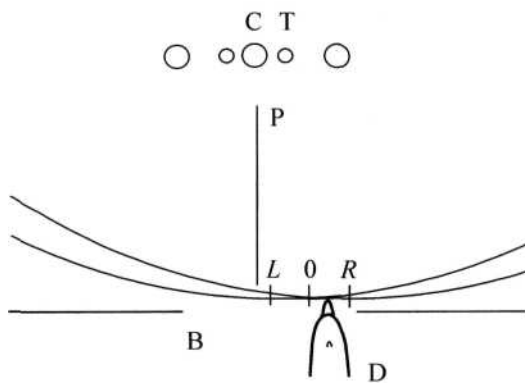


Рис. 2. Конфигурация эксперимента [31] в горизонтальной плоскости. P - разделительная сеть. B - стартовые ворота. D - положение головы дельфина в области старта. L-0-R - моделируемая область акустического поля эха от центрального и правого бокового цилиндров, сферические фронты которых показаны на рисунке. C - цилиндры, диаметр 6 см, высота 13 см. T - шары, диаметр 5 см (положительная мишень) и 3 см, со стороны старта дельфина разнесены на угол  $\pm 1,4^\circ$  относительно разделительной сети. Расстояние от дельфина до мишеней и цилиндров - 7,5 м.

жду мишенями (рис. 1). При такой конфигурации цилиндров был получен наиболее интересный результат. Было установлено, что три цилиндра затрудняют эхолокационное различение шаров меньше, чем два или даже один. Так, если дельфин не в состоянии различать мишени на фоне двух цилиндров, разнесенных на угол, меньший  $\pm 6^\circ$ , то при добавлении третьего цилиндра такого же размера между шарами задача уверенно решается при уменьшении углового расстояния между боковыми цилиндрами до  $\pm 3,5^\circ$  (рис. 1,2). Было также показано, что помеха от трех цилиндров диаметрами, равными 6 см каждый, эквивалентна помехе от двух боковых цилиндров диаметрами, равными 0,6 см. Для объяснения этого эффекта рассмотрим конфигурацию эксперимента (рис. 2). Угловое расстояние между цилиндрами, под которым они видны со стартовой позиции дельфина, было выбрано меньше ширины характеристики направленности излучения дельфина. В этом случае при эхолокационном дифференцировании мишеней дельфин может зафиксировать только два цилиндра одновременно (центральный и один из крайних). Приходящие к дельфину отражения от цилиндров когерентны, как эхо одного зондирующего импульса. В связи с этим можно предположить, что дельфин использует интерференцию мешающих отражений от центрального и одного из боковых цилиндров, в результате которой влияние помех уменьшается. Для проверки этого предположения была построена модель акустического поля

эха цилиндров в области стартовой позиции животного (обозначена L-0-R, рис. 2). Модель также использована для оценки адекватности обсуждаемых моделей эхолокационного слуха дельфина акустическому полю помех от цилиндров.

## ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Для создания модели акустического поля помех использовали эхо от цилиндра. Оцифрованный эхосигнал от цилиндра был получен в результате облучения его импульсом, подобным зондирующему импульсу дельфина [19] (рис. 3а). Два таких эхосигнала - от центрального и правого бокового цилиндров (рис. 2) - использованы для моделирования профилей акустического поля помех. Каждый профиль представляет собой суперпозицию эхосигналов (рис. 3) с временными задержками, соответствующими положению профилей в области L-0-R, (рис. 2). Здесь на глубине 1 м (глубина предъявляемых мишеней и цилиндров) наиболее вероятное место старта дельфина.

Центральный профиль (0 см) модели рассчитан для равных расстояний (по 7,5 м) от стартовой позиции дельфина до центрального и правого бокового цилиндров (рис. 4). Все профили модели акустического поля хранятся в колонках электронной таблицы (типа Excel). Построенная модель (реляционная модель данных) отображает распределение относительных амплитуд звуковых давлений эха от двух цилиндров в области старта дельфина (L-0-R) в виде трехмерной поверхности. Поверхность модели составлена 81 профилем относительных амплитуд звуковых давлений отражений и воспроизводит пространство от L до R с шагом в 1 см (рис. 2).

Дальняя зона (зона Фраунгофера), где фазовая разность хода между фронтами плоской и сферической волн считается достаточно малой, определяется из известного соотношения  $r = L^2/\lambda$ . Отсюда определим размер области сферического волнового фронта L в зоне старта дельфина, который можно аппроксимировать плоской волной:  $L = \sqrt{r\lambda} = 33$  см, где  $r = 7,5$  м - расстояние от цилиндров до стартовой позиции дельфина,  $\lambda \approx 1,4$  см - длина волны максимума энергии мешающих отражений.

Разность фаз между фронтами плоской и сферической волн на краях области ( $L = 33$  см) соответствует профилям модели, расположенным на расстояниях  $\pm 16,5$  см от центрального профиля и будет  $< \lambda/8$  (рис. 4-6).

В профилях модели, расположенных на больших расстояниях ( $\pm 20 - 25$  см) от центрального, взаимодействие (интерференция) эха

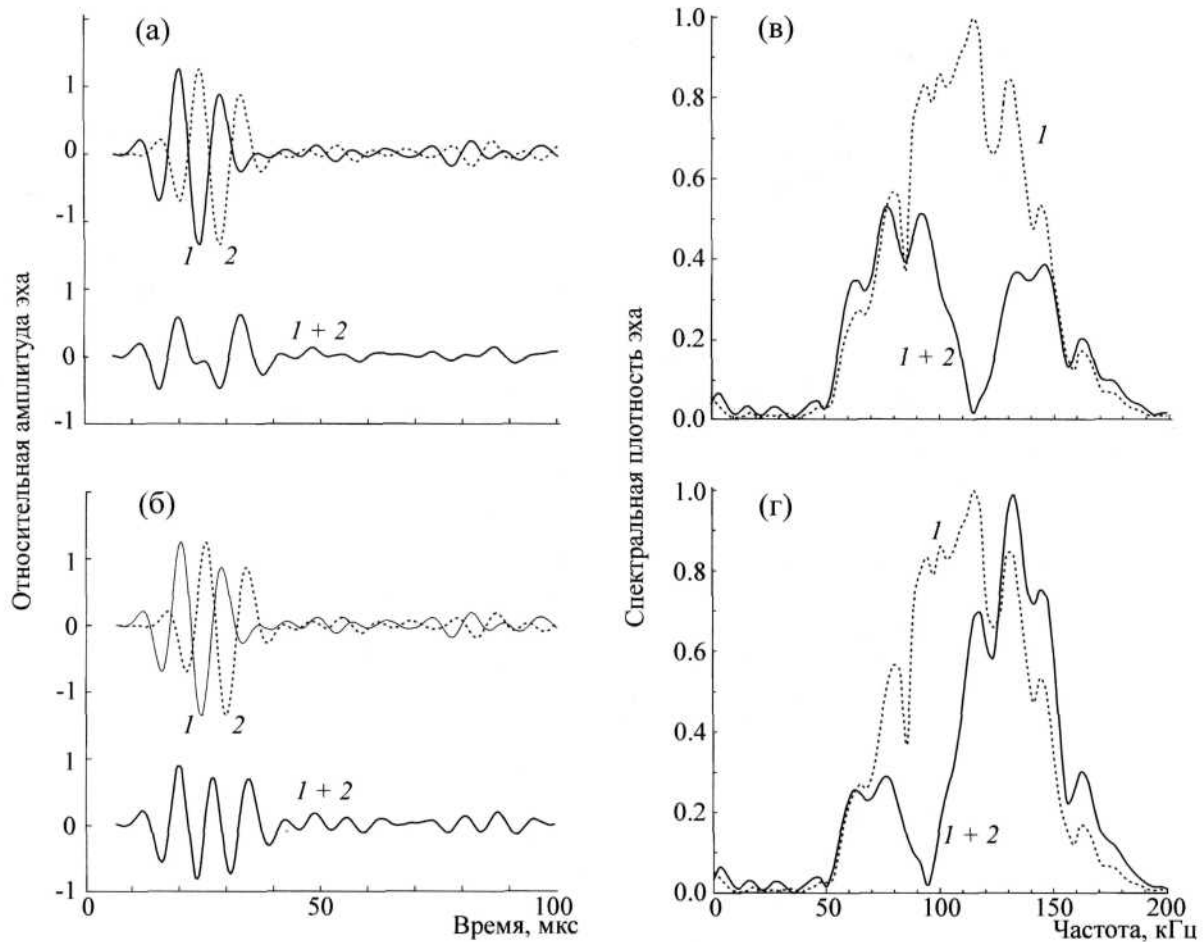


Рис. 3. (а) - Эхо правого бокового цилиндра (1); задержанное на 4,33 мкс эхо центрального цилиндра (2); их суперпозиция, соответствующая профилям  $\pm 6,5$  см модели (1 + 2); (б) - обозначения те же, что на (а), задержка 5,33 мкс, профили  $\pm 8$  см; (в) - энергетический спектр эха цилиндра - (1); энергетический спектр профилей  $\pm 6,5$  см (1 + 2); (г) - обозначения те же, что на (в), профили  $\pm 8$  см модели.

цилиндров заканчивается (рис. 4 - 6), что позволяет рассматривать модель в приближении плоской волны. Отметим, что в характерных точках модели параметры поля пересчитывались с использованием кусочно-линейной аппроксимации сферичности поля. Полученные в рамках поставленной задачи результаты принципиальных отличий от аппроксимации плоской волной не имели.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

В области пересечения волновых поверхностей модели видны интерференционные максимумы и минимумы мешающих отражений (рис. 4). В связи с тем, что скорости волн одинаковы, эта интерференционная картина распространяется в направлении акустических профилей модели. В этом же направлении видны области поверхности модели с меньшими амплитудами

на всем их протяжении. Проанализируем подробнее изменение амплитуд и энергий отражений в профилях модели. Для этого рассмотрим поверхность модели в плоскости, перпендикулярной распространению интерференционной картины волн (рис. 5). В этой плоскости модель воспроизводит распределение максимальных относительных амплитуд звуковых давлений мешающих отражений  $P_m$  в направлении на мишени и цилиндры. Ширина минимумов, где наблюдается существенное взаимное подавление максимальных амплитуд помех (более чем на 6 дБ), не превышает 2 - 3 см. Плотность потока энергии помех  $E$  в каждом профиле модели рассчитана как [38]:

$$E = \frac{1}{\rho c} \int_0^{\infty} P^2(t) dt,$$

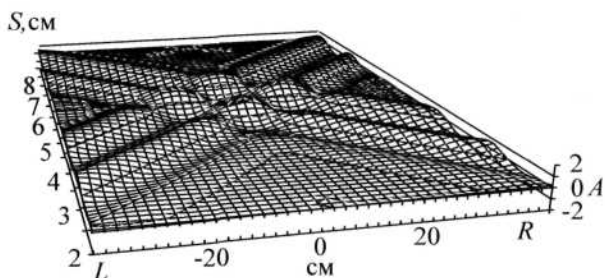


Рис. 4. Модель акустического поля эха цилиндров. Оси координат:  $L$ - $0$ - $R$  - распределение профилей звуковых давлений в горизонтальной плоскости;  $S$  - протяженность профилей звуковых давлений модели в направлении распространения интерференционной картины;  $A$  - относительная амплитуда звуковых давлений эха.

где  $P(t)$  - зависимость изменения звукового давления от времени.

Распределение потоков энергии помех в каждом профиле модели в основном соответствует распределению максимальных амплитуд эха (рис. 6). Здесь также есть два ярко выраженных минимума. При ширине минимумов, равной 2 - 3 см, взаимное подавление энергии помех достигает четырех — шести раз (6 - 7,7 дБ,  $10 \lg E/E_1$ ). Ширина минимумов модели в общем зависит от углового расстояния между помехами (цилиндрами) (рис. 5,6). Она монотонно возрастает от 6 до 11 см (по уровню 1) при уменьшении углового расстояния между цилиндрами от  $\pm 6,5^\circ$  до  $\pm 3,5^\circ$ . При этом расстояние между минимумами монотонно изменяется приблизительно от 13 до 24 см соответственно. Протяженность области интерференции  $S$  (рис. 4) определяется длительностью мешаю-

щих отражений ( $t \approx 30$  мкс), и для скорости звука в воде  $C = 1500$  м/с приблизительно составляет:  $S = Ct = 1500 \cdot 30 \cdot 10^{-6} = 4,5$  см. Энергетические спектры суперпозиции эхосигналов от цилиндров, соответствующие профилям модели (далее спектр профиля), существенно отличаются (рис. 4,5). В качестве примера на рис. 3 показаны спектры профилей  $\pm 6,5$  и  $\pm 8$  см. На частоте  $F_0 = 114,3$  кГц (рис. 3в, кривая 1 + 2) наблюдается максимальное взаимное подавление составляющих спектров отражений в 59 раз (17,7 дБ), и на частоте  $F_0 = 93,8$  кГц, (рис. 3г, кривая 1 + 2) в 41,7 раза (16,2 дБ) относительно спектральных уровней одного цилиндра (рис. 3в,г, кривая 1). Из анализа модели следует, что частота  $F_0$ , на которой происходит наиболее эффективное (десятки раз) взаимное подавление составляющих спектров помех, монотонно изменяется от профиля к профилю. Например, в профилях от  $\pm 12$  до  $\pm 5$  см, где задержка между отражениями изменяется от 8 до 3,33 мкс, частота  $F_0$  изменяется от 62,5 до 150 кГц соответственно.

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В центральном профиле модели (0 см) помехи складываются без относительной задержки между ними, синфазно (рис. 4 - 6). В этом случае их суммарная максимальная амплитуда и энергия достигают максимума. С удалением от центрального профиля между помехами появляется возрастающая временная задержка. В профилях  $\pm 6,5$  см (рис. 5) и  $\pm 12$  см (рис. 6) задержка достигает половины периода эха, что соответствует главным интерференционным минимумам модели. Из анализа профилей модели

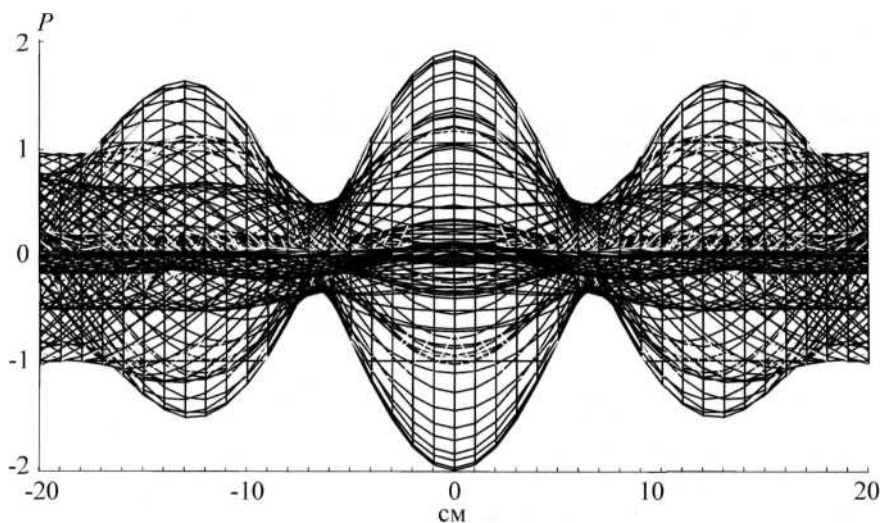


Рис. 5. Распределение максимальных относительных амплитуд звуковых давлений ( $P_m$ ) в профилях модели. Вне зоны интерференции  $P_m = \text{const} = P_1$ . Угол разнесения боковых цилиндров  $\pm 6^\circ$ .

следует, что наилучшими условиями для взаимного подавления помех являются равенство их амплитуд и задержка во времени одного эхосигнала относительно другого на половину периода ( $\sim 5$  мкс). В этом случае максимальные амплитуды уменьшаются почти в 2,5 раза (-7,6 дБ) (рис. 5), а энергия двух помех - в 7 раз (-8,5 дБ) (рис. 6).

Еще более эффективная картина подавления отражений от цилиндров наблюдается в спектральной области (рис. 3). Например, на частотах максимума их энергетических спектров ( $F_0 = 114,3$  кГц) и, соответственно, в области максимальной чувствительности слуха дельфина [21,22] составляющие подавляются в 59 раз (-17,7 дБ) относительно спектральной плотности эха одного цилиндра.

Частота, на которой наблюдается максимальное подавление мешающего эха, монотонно изменяется от профиля к профилю модели и, в соответствии с теорией, определяется положением на оси частот первого нуля модуля огибающей энергетического спектра пары импульсов в зависимости от временной задержки между импульсами ( $t_3$ ), как  $F_0 = 1/(2t_3)$ . Тот факт, что амплитуды составляющих спектров модели на частотах  $F_0$  не достигают нуля, объясняется конечной величиной дискретизации эхосигнала цилиндра во времени.

Представленный выше анализ модели свидетельствует о наличии больших потенциальных возможностей для уменьшения влияния реверберационных помех, возникающих в результате их интерференции, и повышения вследствие этого отношения сигнал/помеха. Какими же характеристиками должен обладать приемник для использования этих возможностей? Для ответа на этот вопрос обратимся к рис. 5 и 6. Нетрудно заметить, что пространственное разрешение поверхности модели с точностью до изменений в каждом профиле возможно приемником с апертурой, меньшей расстояния между профилями. Этому также способствует тот факт, что распространение интерференционной картины акустического поля совпадает с направлением на мишени, и приемник, имеющий достаточно малую (меньше ширины интерференционного минимума) апертуру, может находиться в области минимума на всем протяжении помех. В этом случае отношение сигнал/помеха возрастает пропорционально взаимному подавлению помех. Чтобы разрешение приемника было одинаковым в горизонтальной и вертикальной плоскостях, форма его апертуры должна быть близкой к окружности диаметром  $D$ . В то же время апертура приема не должна быть меньше, чем это необходимо, так как слишком малая апертура, по-видимому, бу-

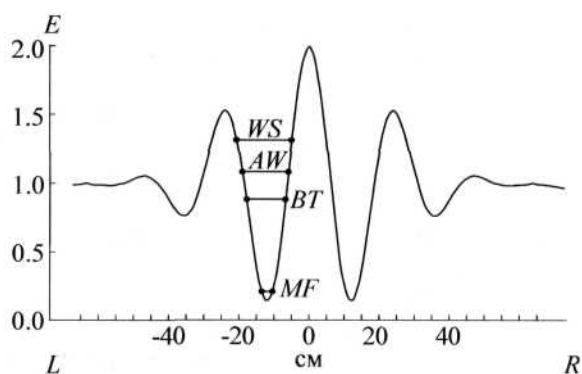


Рис. 6. Распределение относительных плотностей потоков энергии ( $E$ ) помех в профилях модели. Вне зоны интерференции  $E = \text{const} = E_1$ . Угол разнесения боковых цилиндров  $\pm 3,5^\circ$ .  $MF$  - максимальное расстояние между подбородочными каналами левой и правой половин нижней челюсти (3,5 см).  $BT$  - расстояние между барабанными костями (12 см).  $AW$  - расстояние между акустическими окнами (13,5 см).  $WS$  - ширина черепа в области наружных слуховых проходов (16,5 см).

дет уменьшать передаваемую на приемник акустическую энергию и, следовательно, снижать чувствительность приемника.

Ограничение максимальных размеров диаметра апертуры  $D$ , по аналогии с размером щели, применяемой в магнитной и поперечной оптической записи, может быть записано как:  $D \leq \Delta/2$ , где  $\Delta$  - минимальное расстояние между анализируемыми профилями акустического поля (например, для рассматриваемой модели  $\Delta = 1$  см, и  $D \leq 1 \text{ см}/2 \leq 0,5$  см). Из тех же соображений, для ненаправленного приемника размер  $D$  ограничивается длиной волны  $\lambda$ , высшей частоты восприятия животного (для  $F = 150$  кГц,  $\Delta = \lambda = 1$  см и  $D \leq \lambda/2 \leq 0,5$  см).

Приемник, обладающий перечисленными выше особенностями, будем называть - приемником с оптимальной апертурой (ПОА). Он может использовать все рассмотренные выше возможности улучшения отношения сигнал/помеха. Один такой приемник по мере перемещения в акустическом поле и в условиях повторного облучения мишеней (последовательно во времени) позволяет анализировать широкополосный эхосигнал на фоне мешающих отражений с взаимно подавляемыми составляющими спектров на частотах  $F_0$  последовательно во всей полосе частот эха.

Если продолжить эту мысль, то, например, используя многоканальный прием цепочкой расположенных на расстоянии  $D$  друг от друга ПОА, сигналы которых анализируются в узких полосах частот (перекрывающих полосу частот полезного эхосигнала), можно, по-видимому,

получить такое же улучшение отношения сигнал/помеха одновременно во всей полосе частот (параллельно во времени при однократном облучении), если затем сложить сигналы каналов с максимальным отношением сигнал/помеха. Отношение спектральных плотностей энергий сигнал/помеха на частотах  $F_0$  в этих случаях улучшается больше, чем на порядок, и конкретное значение этого отношения можно рассчитать, исходя из спектров профилей (рис. 3), конкретной полосы анализа и ширины интерференционных минимумов. Модель поля также позволяет представить нам, как уменьшается энергия помех (рис. 3 - 6) с уменьшением базы бинаурального приема в границах интерференционного минимума. В этом случае в каждом канале приема существенно улучшается отношение сигнал/помеха на частотах, определяемых положением приемника, его апертурой и величиной базы. Например, для базы приема 1,5 см и положения приемников относительно профилей 6,5 и 8 см, взаимное подавление составляющих спектров реверберационных помех в каждом канале будет выглядеть приблизительно, как на рис. 3в,г, кривые 1 + 2.

Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что приемник с оптимальной апертурой и базой (для бинаурального слуха) способен анализировать тонкую пространственную структуру акустического поля взаимодействующих эхосигналов в месте расположения приемника. Он обладает преимуществом (в обсуждаемом контексте) перед приемником с большой апертурой или базой, который будет усреднять тонкую пространственную структуру акустического поля. Преимущество ПОА особенно заметно на коротких широкополосных эхосигналах и когерентных помехах, присущих работе эхолокатора дельфина.

Обсудим далее, в какой мере рассмотренные свойства ПОА могут быть воплощены в эхолокационном слухе афалины. С этой целью проанализируем возможные пути проведения эха с точки зрения улучшения отношения сигнал/помеха.

Если звук передается в жировой тяж нижней челюсти через подбородочные отверстия, то дельфин может располагать приемники эха в одном интерференционном минимуме помех при всех предъявляемых углах между цилиндрами, получая максимальный выигрыш отношения сигнал/помеха (рис. 5, 6). Об этом же свидетельствует плавный ход зависимости правильных реакций от углового расстояния (рис. 1).

Если дельфин, смещаясь, располагает каждое из «звуковых окон» или наружные слуховые проходы в каждом интерференционном мини-

муме, то для углов между цилиндрами, меньших  $\pm 5^\circ$ , расстояние между минимумами помех будет больше базы слуха ( $>19$  см). Следовательно, левый и правый приемники нельзя расположить так, чтобы иметь выигрыш в отношении сигнал/помеха одновременно в каждом канале. В этом случае дельфин может располагать один из приемников в минимуме помех, тогда второй приемник будет попадать в область, где помехи суммируются и их уровень будет больше, чем уровень одной помехи. Насколько эффективно подобное расположение приемников, в какой-то мере отвечает модельный эксперимент [31].

Три громкоговорителя, расположенные по дуге окружности радиусом 1 м на расстоянии 0,25 м друг от друга, одновременно излучали взаимно когерентные импульсы, полученные путем воздействия на громкоговорители коротких видеоимпульсов. Человек, находящийся в центре окружности, должен был обнаружить импульсы, приходящие со среднего громкоговорителя. Эти импульсы (сигнал) имели максимум энергии на 3 кГц, импульсы боковых громкоговорителей (помеха) имели максимум на 1 кГц. Отношение сигнал/помеха составляло -12 дБ. Если прием осуществлялся через микрофон и передавался испытуемому посредством головных телефонов, то, перемещая микрофон, можно было легко найти область поля, где вследствие деструктивной интерференции помех отношение сигнал/помеха было достаточным для обнаружения сигнала. Практически также легко обнаруживался сигнал при прослушивании одним ухом. Если же испытуемый слушал обоими ушами, то не мог решить задачу. Другими словами, даже если он и располагал одно из ушей в области деструктивной интерференции помех, то помеха на другом ухе вызывала значительную центральную маскировку. В рассмотренных случаях помеха принимается контралатерально сигналу, и хотя контралатеральная (центральная) маскировка в общем меньше ипсилатеральной [39], эксперимент показал, что такое положение приемников менее выгодно с точки зрения отношения сигнал/помеха. Кроме того, у дельфина размеры наружных слуховых проходов, как и акустических окон, не согласуются с рассмотренной концепцией ПОА. Следовательно, можно предположить, что наружные слуховые проходы не принимают существенного участия в восприятии и звукопроведении эхосигналов на улитку, что согласуется с работами [5,8,11-18,27-29,32-37].

Кости верхней и нижней челюстей афалины имеют большие волновые размеры -  $kL > 80$  (где:  $k = 2\pi/\lambda$ , - волновое число,  $\lambda$  - длина волны максимума энергии эхосигналов,  $L$  - характерные размеры рострума) [37] и акусти-

ческий импеданс, в пять раз больший импеданса воды, следовательно, верхняя и нижняя челюсти играют роль эффективного акустически непрозрачного экрана. Для экрана с такими волновыми размерами выполняется условие геометрического рассеяния  $kL \gg 1$ , следовательно, при оценке его эффективности необходимо учитывать угол полного внутреннего отражения. Следует особо отметить, что в секторе углов полного внутреннего отражения эффективность экрана многократно возрастает. Ширина сектора этих углов во фронтальной плоскости нижней челюсти афалины составляет  $\pm 47^\circ$  относительно продольной оси животного [37]. Учитывая, что если ширина характеристики направленности излучения сонара дельфина в этой же плоскости не превышает  $\pm 5^\circ$  [24], то и угловой сектор, откуда к дельфину возвращается эхо, - такой же. Таким образом, эхосигналы падают на нижнюю челюсть и «акустические окна» в секторе углов полного внутреннего отражения, скользят по ее поверхности и рассеиваются. Следовательно, «акустические окна», по-видимому, также не принимают участия в звукопроведении эхосигналов на улитку.

Таким образом, есть основания полагать, что основным путем передачи эхосигналов в жировой тяж мандибулярного канала являются подбородочные каналы. По этому пути эхо передается до среднего уха с наилучшим отношением сигнал/помеха, с согласованием акустических импедансов воды и уха в эхолокационном диапазоне частот 40 - 140 кГц [37], а прием обеспечен оптимальной характеристикой направленности [36]. В этом случае апертура приема определяется размером подбородочных отверстий, а база приема - расстоянием между подбородочными отверстиями левой и правой половин нижней челюсти (0,75 - 3,5 см). Размеры апертуры подбородочных отверстий (~0,3 см) согласуются с рассмотренной выше концепцией о ПОА, а размер базы согласуется с шириной интерференционных минимумов помех. Следовательно, есть основания полагать, что оптимальные (адекватные полю помех) размеры апертуры и базы эхолокационного слуха афалины существенно повышают эффективность защиты сонара к реверберационной помехе.

Поведение животного на старте при различении шаров (рис. 2) также подтверждает выводы, полученные в результате анализа модели помех. Дельфин многократно повторяет облучение мишеней, медленно смещая и поворачивая из стороны в сторону голову (излучатель и приемник). Таким образом, он, по-видимому, ищет оптимальное положение своей нижней челюсти в области старта (где помехи от цилин-

дров взаимно подавляют друг друга) при оптимальном положении характеристики направленности излучения и эхолокационного слуха относительно мишеней и цилиндров. При смещении центрального цилиндра больше чем на 8 см от плоскости мишеней (рис. 2, ближе или дальше относительно дельфина), область интерференции смещалась в сторону от стартовой позиции дельфина, и наличие центрального цилиндра не облегчало выполнение задачи [31].

Известно, что в процессе адаптации к водным условиям среды обитания *Odontoceti* претерпели экстенсивные модификации черепа. Полученные результаты дают основание полагать, что одна из наиболее ярких модификаций черепа - раздвижение (telescoping) [40] - связана, в том числе, и с расположением периферического отдела эхолокационного слуха в нижней челюсти *Odontoceti*, а сближение левой и правой половин нижней челюсти в области подбородочных каналов вызвано оптимизацией размеров апертуры и базы эхолокационного слуха.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. F. C. Fraser and P. E. Purves, *Bull. Brit. Museum Nat. History, Zool.* **7** (1), 1 (1960).
2. F. W. Reysenbach de Haan, *Acta otolaryngol. Suppl.* **134**, 1 (1956).
3. W. H. Dudok van Heel, *Neth. J. Sea. Res.* **1**, 407 (1962).
4. M. Yamada, *Contribution to the anatomy of the organ of hearing of whales. Sci. Rep. Whales. Res. hist.* **8**, 1 (1953).
5. J. G. McCormick, E. G. Wever, J. Palin, and S. H. Ridgway, *J. Acoust. Soc. Amer.* **48** (6), 1418 (1970).
6. G. Fleischer, *J. Audit. Res.* **13**, 178 (1973).
7. Э. Ш. Айрапетьянц, В. А. Воронов, Ю. В. Иваненко и др., *Журн. эволюц. биохимии и физиологии*, № 2, 418 (1973).
8. T. H. Bullock, A. D. Grinell, E. Ikezono, et al., *Z. Vergl. Physiol.* **59**, 117 (1968).
9. D. L. Renaud and A. N. Popper, *J. Exp. Biol.* **63**, 569 (1975).
10. N. A. Dubrovsky, in *Sensory Abilities of Cetacean*, Eds. J. Thomas, R. Kastelein (Plenum Press, N.Y., 1990), pp. 233-254.
11. K. S. Norris, in *Marine bio-Acoustics*, Ed. W. Tavolga (Pergamon Press, N.Y., 1964), pp. 316-336.
12. K. S. Norris, in *Evolution and Environment*, Ed. E. Drake, (Yale Univ. Press, N. Haven, 1968), pp. 297-324.
13. K. S. Norris and G. W. Harvey, *J. Acoust. Soc. Amer.* **56** (2), 659 (1974).
14. D. R. Ketten, *Intern. J. Anim. Sound and Rec.* **8**, 103 (1997).
15. H. N. Koopman, S. M. Budge, D. R. Ketten, and S. J. Iverson, *J. Ocean. Engin.* **31** (1), 95 (2006).



16. S. Nummela, T. Reuter, S. Hemila, et al., *Hear. Res.* **133** (1-2), 61 (1999).
17. S. Hemila, S. Nummela, and T. Reuter, *Hear. Res.* **133**, 82 (1999).
18. R. L. Brill, in *Animal Sonar*, Eds. P. Nachtigall, P. Moor (Plenum Press, N.Y., 1988), pp. 281-287.
19. В. А. Рябов, Дис. канд. биол. наук (СПб., 1991).
20. В. А. Рябов и Г. Л. Заславский, *Сенсорные системы* **12** (2), 202 (1998).
21. В. И. Чилингириш, в сб. *Материалы IX Всесоюз. акуст. конф. Секция Ц* (М., 1977), сс. 17—20.
22. Е. С. Бабушина, *Биофизика* **45** (5), 927 (2000).
23. Е. С. Бабушина и М. А. Поляков, *Биофизика* **48** (2), 332 (2003).
24. W. W. L. Au, in *Animal sonar systems*, Eds. R. Busnel, J. Fish (Plenum Press, N.Y. 1980), pp. 251-282.
25. W. A. Watkins and D. Wartzok, *Mar. Mamm. Sci.* **1**, 219 (1985).
26. N. G. Bibikov, in *Marine mammal sensory systems*, Eds. J. Thomas, R. Kastelein, A. Supin (Plenum press, N.Y., 1992), pp. 197-211.
27. В. Mehl, W. W. L. Au, J. Pawloski, and P. E. Nachtigall, *J. Acoust. Soc. Amer.* **105**, 3421 (1999).
28. R. L. Brill, P. W. B. Moor, and L. A. Dankiewicz, *J. Acoust. Soc. Amer.* **109**, 1717 (2001).
29. R. L. Brill, P. W. B. Moore, D. A. Helweg, and L. A. Dankiewicz, Technical report № 1865, 1 (2001).
30. Л. К. Римская-Корсакова и Н. А. Дубровский, *Сенсорные системы* **12** (4), 497 (1998).
31. В. А. Рябов и Г. Л. Заславский, *Сенсорные системы* **13** (4), 337 (1999).
32. V. A. Ryabov, <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01mr01/367010372.pdf> 2002.
33. V. A. Ryabov, <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01mr01/367007592.pdf> 2003.
34. V. A. Ryabov, in *Abstracts of the XLIXth meeting of IBAC*. [www.cultura.ufpa.br/ibac](http://www.cultura.ufpa.br/ibac) 2003.
35. V. A. Ryabov, *J. Acoust. Soc. Amer.* **114** (4), 2414 (2003).
36. V. A. Ryabov, in *Marine Mammals of the Holarctic*, Ed. V. Belcovich (КМК Scientific press, Moscow, 2004), pp. 483-489.
37. V. A. Ryabov, in *Fourth hit. Conf. on Bio-Acoustics, Loughborough University, UK.* / Eds. S. Dible, P. Dobbins, J. Flint, E. Harland, P. Lepper. (Proceedings of the Institute of Acoustics, 2007). V. 29, Pt. 3, 283-293.
38. Р. Дж. Урик, *Основы гидроакустики* (Судостроение, Л., 1978).
39. С. А. Гельфанд, *Слух: введение в психологическую и физиологическую акустику* (Медицина, М., 1984).
40. G. S. Miller, The telescoping of the cetacean skull. *Smithsonian Misc Coll.* 1923. V.76. P. 1-67.

## Features of the Acoustic Field of Interfering Reflections and the Echolocation Hearing of the Dolphin

V.A. Ryabov

*Karadag Natural Reserve, National Academy of Sciences of Ukraine, Kurortnoe, Feodosiya, Crimea, 98188 Ukraine*

A model of the acoustic field of interfering reflections from steel cylinders was developed. Analysis of the model showed the availability of great potential resources for a decrease of the influence of unwanted echoes and hence for increasing the signal-to-clatter ratio. The conformity of the available models of the echolocation hearing of the dolphin to the acoustic field of the clatter was considered. The participation of mandible mental foramens in conducting the echo to the cochlea was considered. In this case the hearing aperture is determined by the dimensions of mental foramens, while the hearing base is determined by the distance between the mental foramens of the left and right mandible halves. There are good reasons to believe that the optimal dimensions of the aperture and the base of echolocation hearing of Odontoceti essentially increase the effectiveness of defense of their sonar from reverberation.

*Key words: dolphin, mental foramens, echolocation, hearing, signal-to-clatter ratio*