

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСТОЧНИКА ЗОНДИРУЮЩИХ ИМПУЛЬСОВ У ДЕЛЬФИНА: ВЛИЯНИЕ КРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

© 2004 г. Н. А. Дубровский, А. В. Гладилин, Б. Мель\*, М. Валберг\*

Акустический институт имени Н.Н. Андреева, РАН

117036 Москва, ул. Шверника

E-mail: dubrov@akin.ru

\* Институт биологических наук Университета Орус, Дания

Поступила в редакцию 02.12.2003 г.

Представлены физическая (ФМ) и математическая (ММ) модели источника зондирующих импульсов дельфинов. ФМ состоит из баллона со сжатым газом, соединенным с резиновой трубкой, часть которой находится в воде. Упругое резиновое кольцо надето на подводную часть трубки. Это кольцо блокирует поток газа по трубке от баллона. Кольцо может совершать автоколебания, вызванные потоком газа. В простейшем случае периодические смещения поверхности кольца имеют треугольную форму. Поскольку градиент звукового давления пропорционален второй производной смещения, то на участках перегиба кривой, характеризующей зависимость смещений от времени, возникают короткие импульсы – щелчки. ММ описывает дипольные колебания сферы, “вмороженной” в кольцо, и позволяет получить форму волны и звуковое давление генерируемых щелчков. Критическими параметрами ММ являются радиус сферы, пиковое значение и длительность треугольного смещения кольца. ММ позволяет решать как прямую задачу (получение параметров акустических щелчков по известным параметрам источника), так и обратную (вычисление параметров модели по осциллограммам щелчков). Записи щелчков китообразных были использованы для получения, как параметров смещения, так и размеров вмороженной сферы или структуры, выполняющей такую же функцию. ММ предсказывает максимальный уровень источника щелчков до 235 дБ при радиусе вмороженной сферы 5 см и максимальном смещении 4 мм. Предсказанные уровни звукового давления щелчков оказываются близки уровню сигналов у китообразных.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В предыдущих работах мы предполагали, что источник акустических импульсов у дельфинов приводится в действие давлением воздуха, создаваемого в верхних дыхательных путях дельфина либо легкими, либо мышцами воздушных мешков [1–3]. Важным аспектом этого предположения было формирование потока воздуха через некоторый проход, который блокируется сфинктером (мышцальной пробкой, “губами”). Была создана физическая модель носового прохода (рис. 1), которая состояла из датчика смещений 1, резиновой трубки 3 открытой с одного конца и соединенной с баллоном сжатого газа с другого [1–3]. На погруженную в воду часть трубки надевалось резиновое кольцо 2, которое блокировало прохождение газа до тех пор, пока его давление в трубке не превышало некоторый порог. Увеличивая это давление, можно было вызвать в модели типичные автоколебания, при которых трубка периодически приоткрывалась на короткий промежуток времени (рис. 1). С помощью датчика 1 (рис. 1) наблюдали смещение кольца. Форма этого смещения могла быть весьма разнообразной, включая и треугольную в простейшем случае.

Осциллирующее кольцо является источником акустических щелчков, которые “привязаны” во времени к изгибам кривой смещения, что и следо-

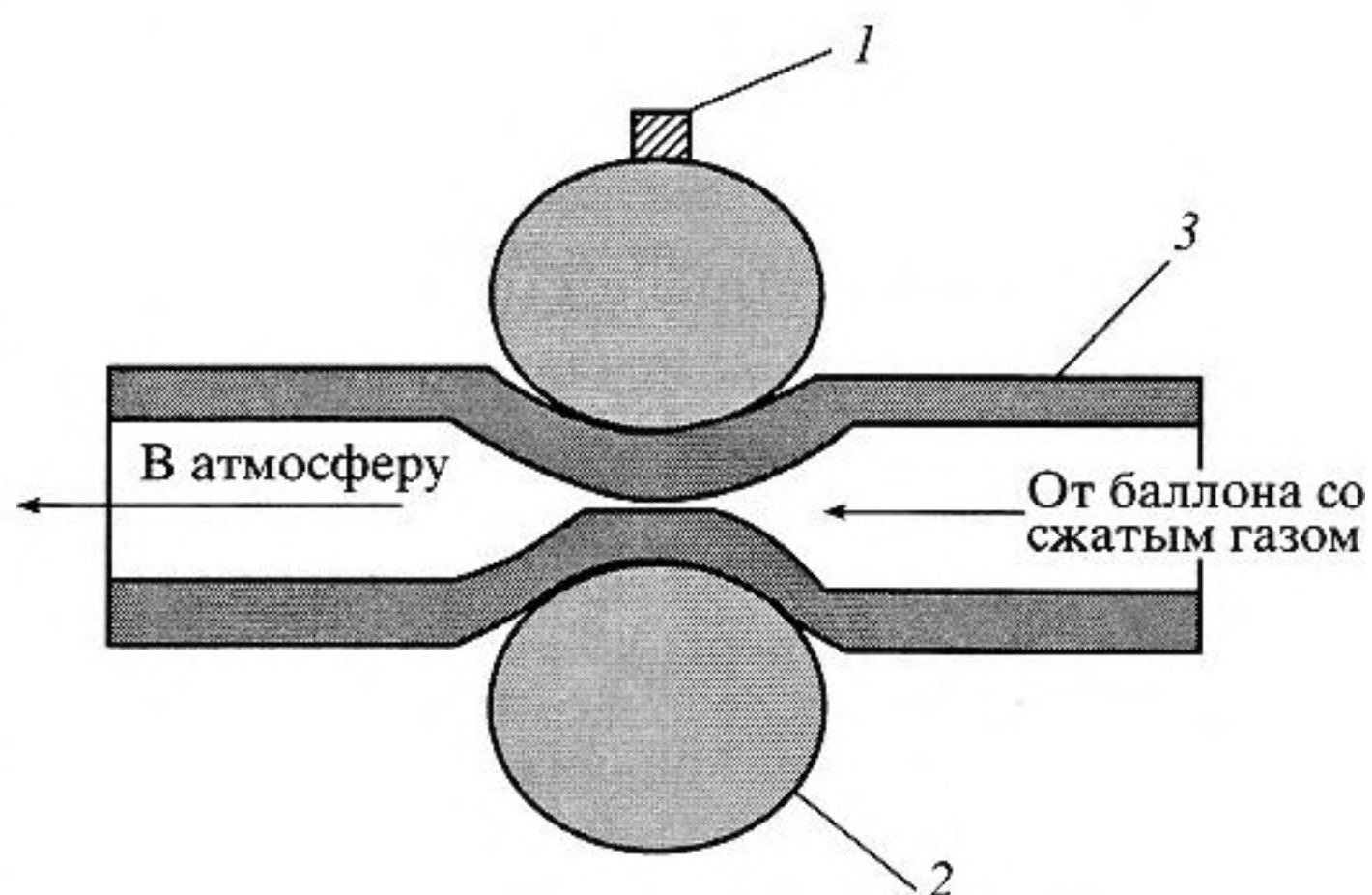
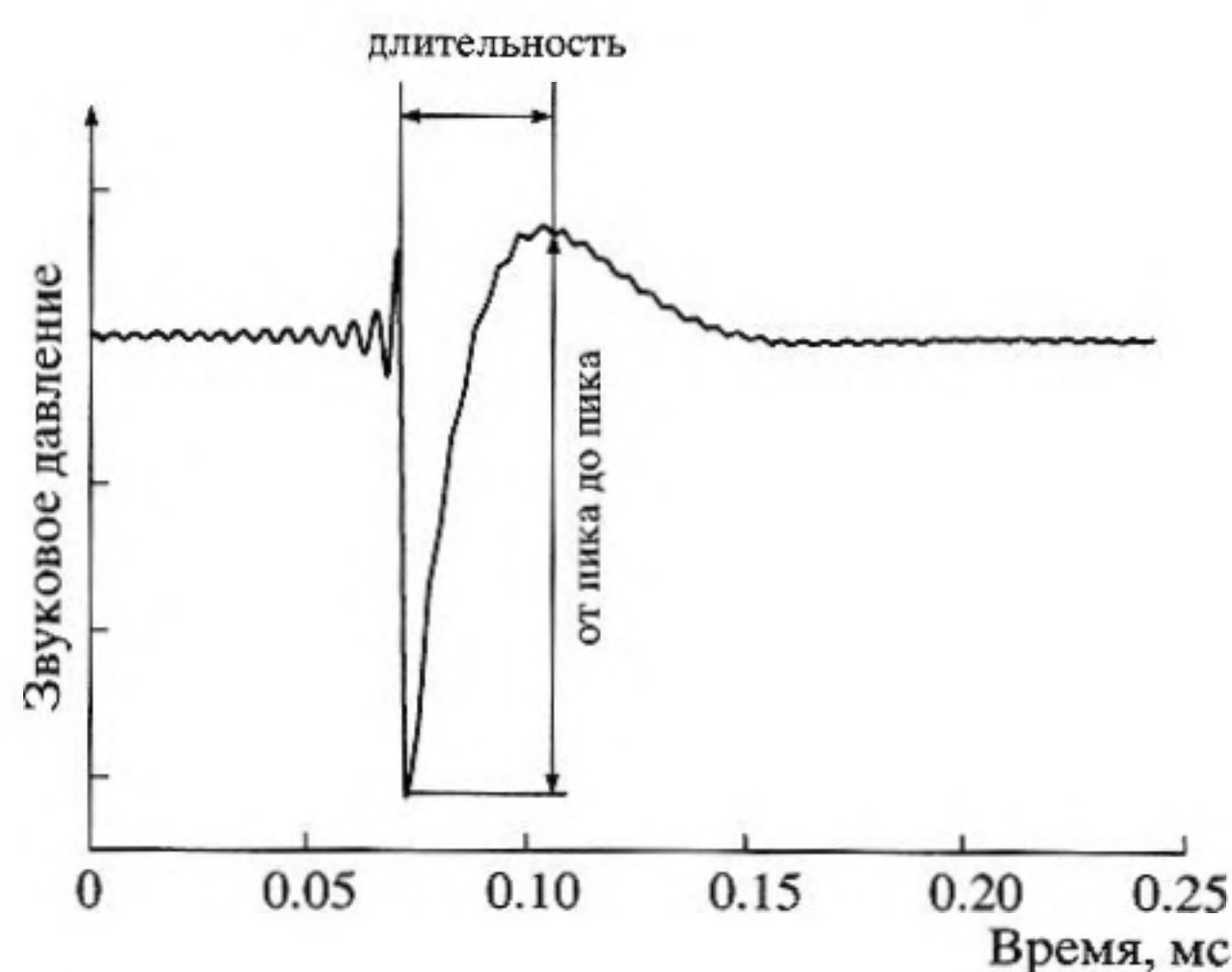


Рис. 1. Схематическое изображение подводной части физической модели источника эхолокационных щелчков. 1 – датчик смещений; 2 – резиновое кольцо; 3 – резиновая трубка. Показано состояние ФМ, когда давление воздуха превалирует над сжимающими силами кольца, и воздух проходит по трубке.



**Рис. 2.** Форма модельного щелчка при треугольном смещении “вмороженной” сферы. По горизонтали — время, по вертикали — звуковое давление щелчка. Длительность щелчка определена как время между пиками полуволн сжатия, звуковое давление щелчка от пика до пика — как величина от максимального пика разрядки до максимального пика сжатия. Длительность треугольного смещения 1 мс, радиус “вмороженной” сферы 3 см, МТС 2 мм.

вало ожидать, так как градиент звукового давления пропорционален второй производной по времени от смещения.

Была разработана простая математическая модель (ММ), основанная на описанной выше физической модели [1–3]. В этой модели предполагалось, что резиновое кольцо неподвижно, за исключением небольшого сферического участка, который и совершал упомянутые выше автоколебания. Предполагалось также, что эта сфера не имеет массы. Акустическое давление, вызванное смещением сферы (акустический диполь) с круговой частотой  $\omega = 2\pi f$ , может быть выражено следующим образом [4]:

$$p(r, t) = ip\omega^2 a^3 \xi(\omega) \times \frac{(ikr - 1) \cos \alpha \exp(-ika) \exp(ikr - i\omega t)}{(2 - 2ika - (ka)^2) r^2}.$$

Здесь  $a$  — радиус “вмороженной” сферы,  $r$  — расстояние от центра сферы до точки наблюдения,  $k = \omega/c$  — волновое число,  $\rho$  и  $c$  — плотность биологических тканей, окружающих источник, и скорость звука в этих тканях,  $\alpha$  — угол между осью диполя и направлением на точку наблюдения,  $\xi(\omega)$  — преобразование Фурье от волны смещений сферы. На данной стадии анализа мы предполагаем, что указанные биологические структуры представляют собой жидкость, плотность и скорость распространения звука в которой равна плотности и скорости звука в воде, что приблизи-

тельно верно [5]. Мы пренебрегаем также искажениями, вызванными дифракцией щелчка на сложных структурах воздушных мешков и проходов, а также мелона. Некоторые соображения по этому поводу будут обсуждаться ниже.

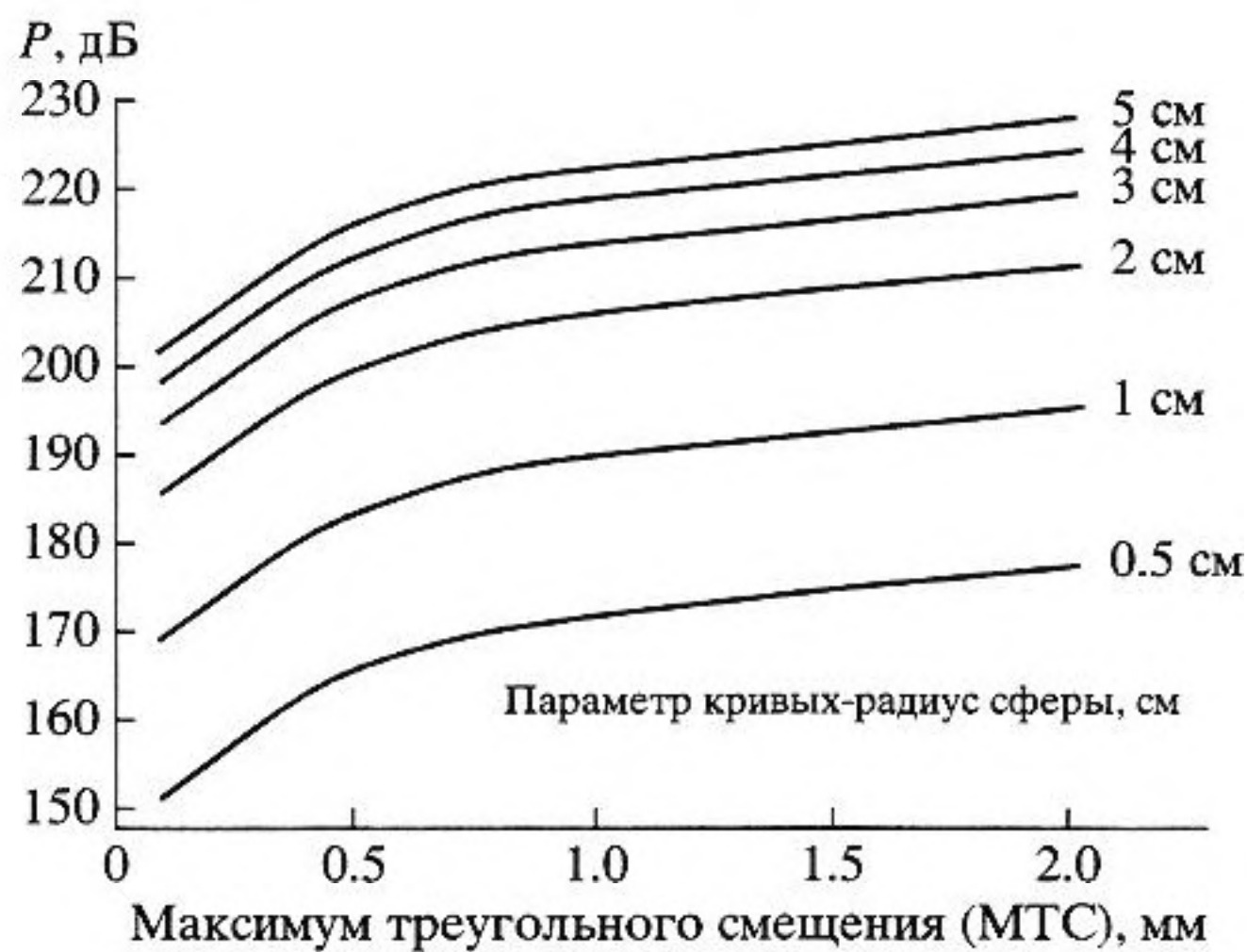
Форма волны звукового давления рассчитывалась путем обратного преобразования Фурье от комплексного спектра щелчка, взятого из формулы (1). Вычисленные акустические щелчки оказались на самом деле “привязаны” во времени к изгибам кривой смещений сферы, что соответствовало наблюдениям на физической модели источника [3].

В этой статье мы далее исследуем влияние критических параметров математической модели на звуковое давление (от пика до пика) модельного щелчка, его длительность и максимум (пик) спектральной плотности (ПСП). Критические параметры модели — радиус “вмороженной” сферы, длительность и максимум (высота) треугольного смещения (МТС). Дается сравнение результатов имитационного моделирования с экспериментальными данными для различных видов дельфинов. Здесь мы рассмотрим только прямую задачу (определение свойств акустических щелчков по известным параметрам источника). Решение обратной задачи (вычисление параметров источника по осциллограммам акустических щелчков) будет предметом особой статьи.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

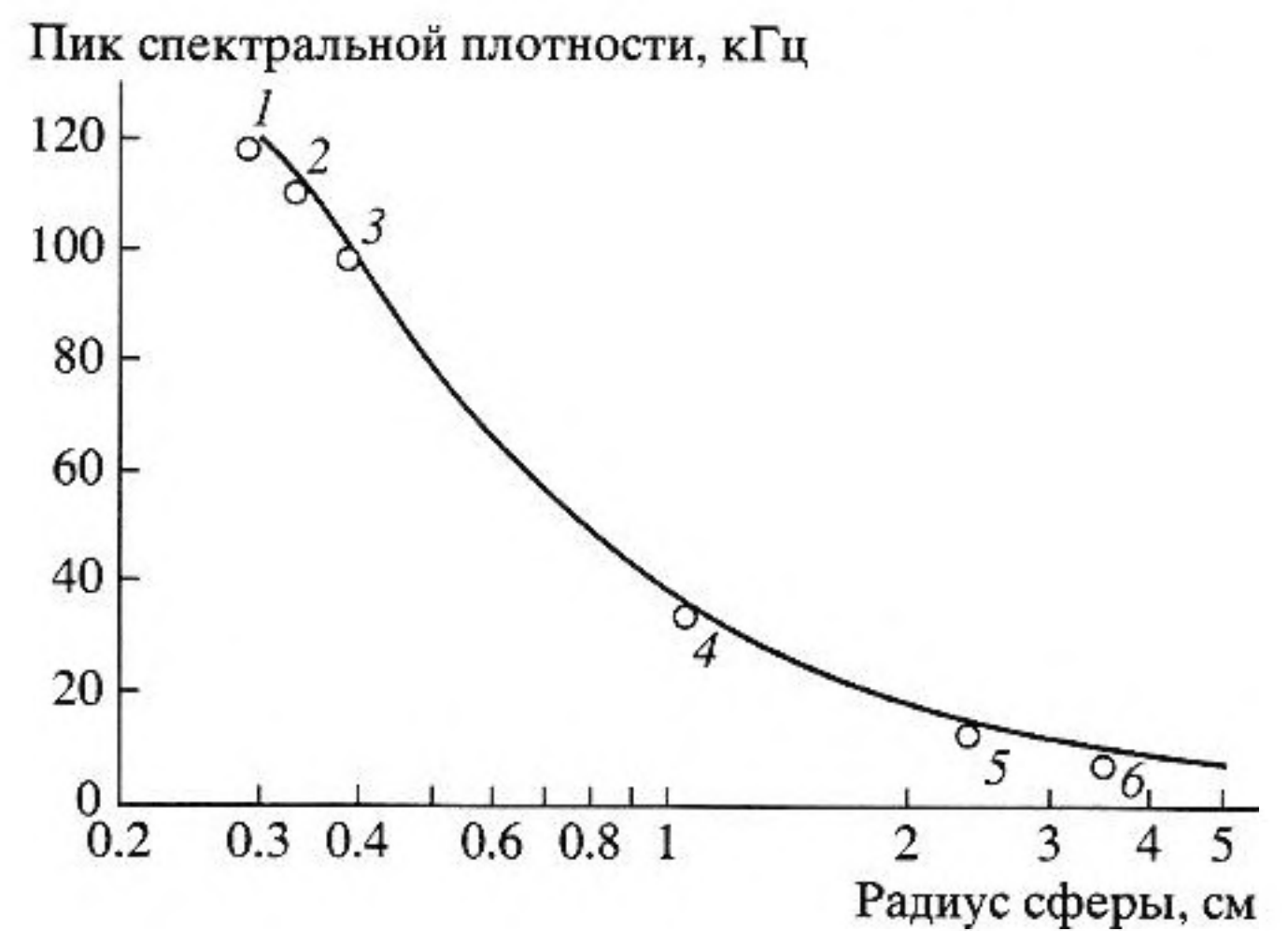
Рассмотрим сначала зависимость акустического давления от времени (форму щелчка). На рис. 2 представлена форма щелчка и способ определения длительности и величины звукового давления щелчка (от пика до пика) для случая, когда в качестве волны смещения “вмороженной” сферы взят треугольник. Щелчок имеет небольшой положительный пик (пик сжатия), большой короткий отрицательный пик (пик разрядки), сопровождаемый относительно растянутым во времени положительным пиком (пиком сжатия). Модельный щелчок напоминает простейший щелчок дельфина (“типичный”, “прямой” или “стандартный”), наблюдавшийся у различных видов дельфинов [6–10] (в большинстве случаев в небольших бассейнах). Недавно, однако, “типичная”, или “стандартная” форма щелчка получена на касатке в открытой воде [11].

“Стандартный” щелчок дельфина также состоит из полуволн сжатия, разделенных полуволной разрежения с большим пиковым значением. Большинство щелчков, зарегистрированных в воде, отличаются по форме волны от стандартного, поскольку они сформированы “большим числом отраженных импульсов, которые принима-



**Рис. 3.** Уровень источника УИ в децибелах модельных щелчков как функция максимума треугольного смещения (МТС) “вмороженной” сферы в миллиметрах при различных радиусах “вмороженной” сферы в сантиметрах, указанных числами вблизи соответствующих кривых. Длительность треугольного смещения 1000 мкс.

ются почти одновременно вскоре после прихода прямого импульса, так как область мелона расположена вблизи воздушных мешков и тех участков черепа, которые могут отражать акустическую энергию в область мелона” [10]. Щелчки, зарегистрированные в воде, содержат несколько осцилляций на частоте приблизительно соответствующей частоте пика спектральной плотности. Слабо выраженность в нашей математической модели первой половины сжатия обусловлена тем, что волна смещений является идеальным треугольником. Данные, представленные на рис. 3, позволяют оценить приведенный к расстоянию 1 м (относительно 1 мкПа) уровень звукового давления источника (УИ) модельного акустического щелчка при различных радиусах “вмороженной” сферы и различных значениях максимумов треугольного смещения сферы (МТС). Например, уровень источника может составлять всего 150 дБ при радиусе вмороженной сферы 0.5 см и МТС = 0.1 мм. При увеличении радиуса сферы до 5 см и МТС до 2 мм уровень источника увеличивается почти до 230 дБ. Отметим, что формула (1) справедлива при условиях [5], что максимум смещения  $h$  много меньше радиуса вмороженной сферы  $a$  ( $h \ll a$ ) и длины волны  $\lambda$  ( $h \ll \lambda$ ). В нашем случае максимальное значение  $h$  равно 2 мм, а минимальное значение радиуса  $a = 3$  мм. Таким образом, максимально допустимое значение  $h$  при  $a = 3$  мм не должно быть более 1 мм. Для оценки второго условия длину волны следует брать минимальной, что соответствует высокочастотной границе спектра щелчка. При верхней частоте са-



**Рис. 4.** Пик спектральной плотности (ПСП) модельного щелчка в зависимости от радиуса “вмороженной” сферы. Форма смещения сферы – треугольник при постоянном МТС = 2.0 мм и длительности смещения 1000 мкс: 1 – морская свинья [12], 2 – Атлантический бутылконосый дельфин [10], 3 – белуха [15, 16], 4 – нарвал [17], 5 – косатка [11], 6 – кашалот [18].

мого “высокочастотного” сигнала китообразного 200 кГц длина волны будет около 7.5 мм. Это означает, что при  $h$  не более 2 мм условие  $h \ll \lambda$  будет выполняться во всем диапазоне частот.

Влияние радиуса сферы на уровень звукового давления щелчка гораздо больше, чем влияние максимального смещения (МТС), что легко видеть из формулы (1). Десятикратное увеличение максимального смещения (с 0.2 мм до 2.0 мм) увеличивает уровень источника на 25 дБ, тогда как десятикратный рост радиуса сферы увеличивает уровень источника приблизительно на 50 дБ.

На рис. 4. показана зависимость пика спектральной плотности модельного щелчка от радиуса “вмороженной” сферы. Этот пик смещается в область более низких частот при увеличении радиуса сферы. Наиболее значительные изменения положения пика наблюдаются при увеличении радиуса от 0.3 см до 1.5 см. В этом интервале радиусов пик смещается с 120 кГц на 30 кГц. График на рис. 4 предоставляет возможность проверки применимости нашей модели путем оценки размера “вмороженной” сферы для различных видов дельфинов и сравнения полученных оценок с аналогичными биологическими структурами, предположительно ответственными за излучение щелчков. Результаты оценки радиуса “вмороженной” сферы для различных видов китообразных показаны на рис. 4 кружками и представлены также в таблице.

Были выбраны семь видов зубатых китов, которые максимально отличаются весом и разме-

Оценка радиусов эквивалентных “вмороженных” сфер по кривой рис. 4, с использованием сведений о положении пика спектральной плотности щелчков для дельфинов различных видов

Вид дельфина	Пределы положения пиков спектральной плотности, кГц	Радиус эквивалентной сферы, см	Литературный источник
Морская свинья	120–140	0.25 (экстраполяция)	[12]
Атлантический бутылконосый дельфин	110–130	0.30	[13]
Дельфин Риссо	47.9	0.77	[14]
Белуха	100–115	0.35	[15, 16]
Нарвал	40	1.00	[17]
Касатка	14–20	2.3	[11]
Касатка в условиях бассейна	14–20	2.3	[7]
Кашалот	10–12	3.50	[18]

ром: от самого маленького с максимально высокой частотой пика спектральной плотности (морская свинья [12]) до самого крупного с минимальным значением пика спектральной плотности (кашалот [18]). Наша модель предсказывает, что радиус вмороженной сферы (или ее биологического коррелята) изменяется у разных животных от 0.25 см до 3.50 см.

Длительность модельного щелчка (рис. 5) изменяется почти пропорционально радиусу “вмороженной” сферы от 5 мкс при радиусе 0.3 см до

53 мкс при радиусе 5.0 см. Оценки длительности стандартных щелчков для шести видов китообразных указаны кружками на рис. 5. Для сравнения с модельными были выбраны экспериментальные щелчки, излученные во фронтальном направлении (нулевой азимут и угол возвышения).

Длительности стандартных щелчков различных видов дельфинов оценивались так же, как и длительность модельного щелчка (рис. 1). Для таких оценок использовались осциллограммы щелчков, приведенные в литературных источниках, указанных в подписи к рис. 5.

Длительность модельного щелчка, мкс

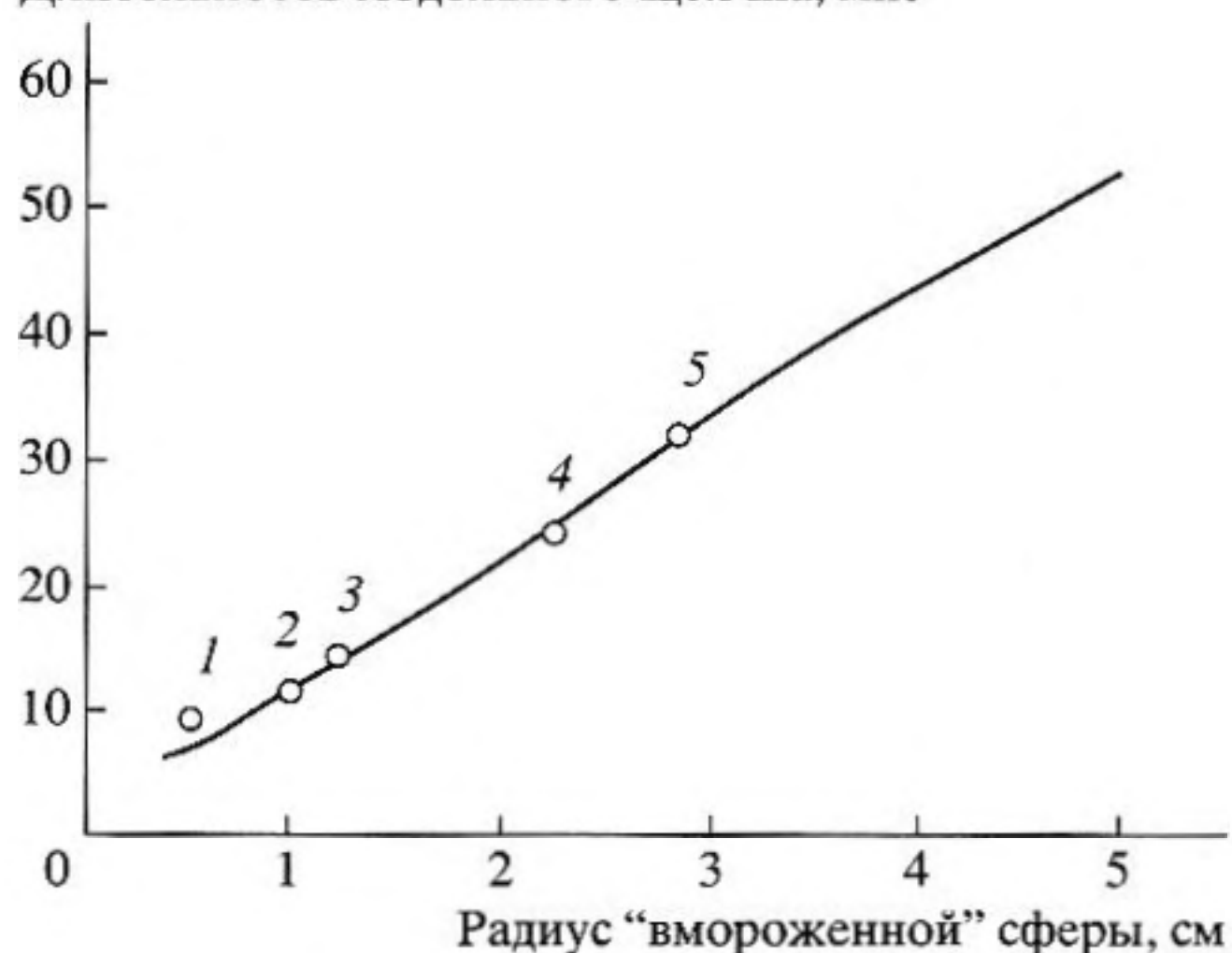


Рис. 5. Длительность модельного щелчка в микросекундах как функция радиуса “вмороженной” сферы в сантиметрах. Длительность треугольника смещения 1000 мкс, максимум смещения 2 мм. Кружки показывают длительности стандартных щелчков китообразных: 1 – атлантический бутылконосый дельфин [10, 13], 2, 3 – дельфин Риссо [14], 4, 5 – касатка [11].

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ

Сравним сначала форму волны модельного щелчка и реального акустического щелчка китообразных.

“Стандартный” или “прямой” щелчок дельфина состоит из двух полуволн сжатия, разделенных полуволной разрежения с большим пиковым значением, чем у полуволн сжатия. Отсутствие четко выраженной первой положительной полуволны у модельного щелчка связано с использованием идеальной треугольной формы для временной зависимости смещения “вмороженной” сферы. Кроме того, реальные щелчки китообразных (в отличие от модельного) не имеют такого крутого фронта, с которого начинается фаза разрежения модельного щелчка. Наличие крутого фронта у щелчков дельфина означало бы большое ускорение биологического коррелята “вмороженной” сферы, вызванное большим давлением воздуха в носовых ходах. В действительности, это давление сравнительно невелико, и при наличии не равной нулю массы сферы будет происходить сглаживание резких перепадов звукового давления.

Как правило, зондирующие импульсы дельфина (щелчки) отличаются от стандартной формы, так как они формируются “большим числом импульсов, претерпевших внутренние отражения, и которые приходят следом за прямым импульсом, поскольку область мелона расположена вблизи воздушных мешков и костей черепа, отражающих акустическую энергию в область мелона” [10]. Акустические щелчки, регистрируемые в направлениях, отличных от направления вдоль продольной оси тела дельфина также содержат несколько колебаний, частоты которых грубо соответствуют пику спектральной плотности щелчка [10].

Анализ рис. 3 показывает, что диапазон пиковых значений щелчков в нашей модели меняется от 150 дБ до 230 дБ при увеличении радиуса “вмороженной” сферы от 0.5 см до 5.0 см и максимума треугольного смещения сферы от 0.2 мм до 2 мм. При сравнении этих модельных данных с реальными, следует учитывать, что понятие уровень излучения дельфина [10] включает как сам источник щелчков, так и биологические структуры (кости черепа, мелон, воздушные мешки и т.п.), участвующие в формировании временной и пространственной структуры (направленности) щелчка в воде. Ау [10] обобщил данные по уровням излучения для щелчков, записанных в бассейнах и в открытой воде для различных видов морских и пресноводных дельфинов. По его данным, уровни излучения варьируют от 151 дБ для дельфина Гектора до 228 дБ для ложной касатки и Атлантического и Тихоокеанского бутылконосых дельфинов.

Максимальное значение УИ среди зубатых китообразных (235 дБ) выявлено у кашалота [18]. На рис. 3 не представлены расчеты для радиуса сферы и МТС, соответствующие этому уровню излучения. По оценкам, полученным по пику спектральной плотности, лежащему в пределах (10–12) кГц, радиус эквивалентной сферы для кашалота близок к 3.5 см (рис. 4). Для того, чтобы получить согласие этой оценки с оценками радиуса эквивалентной сферы по уровню излучения, необходимо, чтобы максимум треугольного смещения сферы 3.5 см был равен приблизительно 4 мм.

Важно учитывать, что в зависимости от эхолокационной ситуации уровни излучения у дельфинов могут значительно варьировать. Сообщалось о повышении черноморской афалиной уровня излучения на 27 дБ при обнаружении ею мишени на фоне шумовых помех, уровень которых возрастал [19]. Показано также, что при увеличении дальности лоцируемой мишени до 600 м уровень излучения щелчков возрастает в среднем на 52 дБ – от 170 до 222 дБ [20]. Ау и Полоски [21] обнаружили изменение уровня излучения на 12 дБ у афа-

лины, которая различала мишени на фоне маскирующего шума.

Как уже отмечалось, при изменении максимума треугольного смещения сферы от 0.2 до 2 мм уровень излучения (УИ) в модели возрастает всего на 25 дБ. Между тем увеличение УИ щелчков черноморской афалиной в опытах М.П. Иванова [20] достигало 52 дБ при удалении обнаруживаемой мишени на 600 м. Для объяснения такого увеличения, оставаясь в рамках предлагаемой модели, следует допустить возможность для китообразных как-то изменять радиус эквивалентной сферы, т.е. размер той доли “губы” или мускульной пробки, участвующей в дипольных осцилляциях при излучении щелчка. Такое изменение, как следует из рис. 3, позволяет изменять УИ на 50 дБ. Возможно, что эхолоцирующие китообразные используют обе возможности – изменяют максимум смещений и размер эквивалентной сферы.

Ау с соавторами [11] приводит данные об излучении касаткой акустических щелчков, спектр которых имеет два выраженных пика: низкочастотный с максимумом между 20 и 30 кГц и высокочастотный с пиком, расположенным между 40 и 60 кГц. Одновременное излучение низких и высоких частот может свидетельствовать в пользу предположения, что китообразные одновременно или с задержкой порядка длительности щелчка “используют” две разных эквивалентных сферы – большую – для получения низкочастотного щелчка и меньшую – для получения высокочастотного [22]. Это предположение, однако, нуждается в дополнительном анализе.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлено развитие имитационной модели генерации акустических щелчков у зубатых китообразных, основанной на разработанной ранее математической модели источника акустических щелчков и описанной ранее в работах [1–3]. Разработано программное обеспечение, позволившее изучить влияние критических параметров математической модели (радиуса “вмороженной” сферы и максимума ее треугольного смещения) на приведенное к 1 м звуковое давление щелчков (уровень источника), положение максимума спектральной плотности щелчка и его длительность.

Проведено сравнение модельных данных с экспериментальными данными для различных видов китообразных.

Показано, что форма щелчка в общих чертах соответствует форме “прямого” или “стандартного” щелчка зубатых китообразных. Она состоит из первого пика сжатия, пика разряжения и второго пика сжатия. Такие щелчки наблюдаются в направлении продольной оси тела животного (при нулевых азимуте и угле места). Для более

полного соответствия модели биологическому прототипу необходимо учесть массу осциллирующей замороженной сферы и сопоставить давление воздуха необходимое для создания требуемого смещения сферы с измеренными значениями в носовых ходах дельфинов.

Хотя диапазоны значений радиусов замороженных сфер (0.25 см–5.00 см) и МТС – максимумов смещений сферы (0.2 мм–2.0 мм) – были выбраны произвольно, исходя из предполагаемых размеров биологических структур, ответственных за генерацию щелчков, тем не менее, диапазон уровней излучения, предсказанных моделью (150–230 дБ), вполне удовлетворительно соответствует уровню излучения сигналов различными видами зубатых китов.

Наблюдавшиеся максимальные изменения уровня излучения (до 52 дБ) при удалении лоцируемой мишени до 600 м [20] не удается объяснить только изменением максимума смещения, составляющим всего 25 дБ для использованного диапазона МТС. Требуется дополнительно допустить, что животные каким-то образом изменяют размер биологического эквивалента “замороженной” сферы.

Авторы выражают признательность Датскому исследовательскому совету (Danish Research Council) за финансовую поддержку работы, осуществленную через Центр по звуковой коммуникации (Center for Sound Communication).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Giro L.R., Dubrovskiy N.A. A model of an acoustic source of probing pulses in the dolphin / Proc. XXIII Intern. Physiol. Congr. Saint Petersburg. 1997.
2. Giro L.R., Dubrovskiy N.A. A plausible mechanism of acoustic click production in the dolphin // J. Acoust. Soc. Amer. 1999. V. 105. № 2. Pt. 2. P. 1263.
3. Giro L.R., Dubrovskiy N.A. Modeling of the clicks production mechanism in the dolphin / In: Echolocation in Bats and Dolphins, edited by J. Thomas, C. Moss, V. Vater. Chicago University Press. 2003. Chapter 10. P. 59–65.
4. Исакович М.А. Общая акустика. М.: Наука, 1973. С. 495.
5. Norris K.S., Harvey G.W. Sound transmission in porpoise head // J. Acoust. Soc. Amer. 1974. V. 56 P. 659–664.
6. Diercks K.T., Trochta R.T., Greenlaw C.F., Evans W.E. Recording and analysis of dolphin echolocation signals // J. Acoust. Soc. Amer. 1971. V. 49. P. 1729–1732.
7. Evans W.E. Echolocation by marine delphinids and one species of fresh-water dolphin // J. Acoust. Soc. Amer. 1973. V. 54. P. 191–199.
8. Дубровский Н.А., Заславский Г.Л. О временной структуре и направленности звукоизлучения у афалины / Доклады VIII-й Всес. Акуст. конф. 1973. Секция Ц. С. 56–59.
9. Белькович В.М., Дубровский Н.А. Сенсорные основы ориентации китообразных. Л.: Наука, 1976. 336 с. (English Translation: Sensory basis of cetacean orientation. Joint Publications Research Service L/7157, Arlington, VA, 1977. 200 p.)
10. Au W.W.L. The sonar of dolphins. Springer-Verlag: New York, 1993. 277 p.
11. Au W.W.L., Ford J.K.B., Horne J.K., Newman Allman K.A. Echolocation signals of free-ranging killer whales (*Orcinus orca*) and modeling of foraging for chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*) // J. Acoust. Soc. Am. 2004. V. 115. № 2. P. 901–909.
12. Møhl B., Andersen S. Echolocation: high frequency component in the click of the Harbour porpoise (*Phocoena phocoena* L.). J. Acoust. Soc. Amer. 1973. V. 54. P. 1368–1372.
13. Au W.W.L. Echolocation signals of the Atlantic bottlenose dolphin (*Tursiops truncatus*) in open waters. In: Busnel R.G., Fish J.F., eds, Animal Sonar Systems. New York: Plenum Press, 1980. P. 251–282.
14. Philips J.D., Nachtigall P.E., Au W.W.L., Pawloski J.L., Roitblat H.L. Echolocation in the Risso's dolphin, *Grampus griseus* // J. Acoust. Soc. Am. 2003. V. 113. № 1. P. 606–616.
15. Au W.W.L., Carder D.A., Penner R.H., Scronce B.L. Demonstration of adaptation in beluga whale echolocation signals // J. Acoust. Soc. Amer. 1985. V. 77. P. 726–730.
16. Au W.W.L., Penner R.H., Turl C.W. Propagation of beluga echolocation signals // J. Acoust. Soc. Amer. 1985. V. 82. P. 79–120.
17. Møhl B., Surlykke A., Miller L.A. High intensity Narwhal clicks // In: Thomas J.A. and Kastelein R.A., eds., Sensory Abilities of Cetaceans. New York. Plenum Press. P. 295–303.
18. Møhl B., Wahlberg M., Madsen P.T., Heerfordt A., Lund A. The monopulsed nature of sperm whale clicks. J. Acoust. Soc. Amer. 2003. V. 114. № 2. P. 1143–1154.
19. Бабкин В.П., Дубровский Н.А. О дальности действия и помехоустойчивости эхолокационного аппарата дельфина – афалины при обнаружении различных мишеней / Труды Акустического института, 1971. В. 17. С. 29–42.
20. Иванов М.П. Эхолокационные сигналы дельфина (*Tursiops truncatus*) при обнаружении и распознавании подводных объектов. Диссертация, Санкт-Петербургский госуниверситет, СПб.: 1999. 137 с.
21. Au W.W.L., Pawloski D.A. Detection of complex echoes in noise by an echolocating dolphin // J. Acoust. Soc. Amer. 1988. V. 70. P. 662–668.
22. Cranford T.W., Amundin M., Norris K.S. Functional morphology and homology in the Odontocete nasal Complex: implication for sound generation // J. Morphol. 1996. V. 228. P. 223–285.

## **Modeling of the Dolphin's Clicking Sound Source: The Influence of the Critical Parameters**

**N. A. Dubrovskiy, A. V. Gladilin, B. Mohl, M. Wahlberg**

A physical and a mathematical models of the dolphin's source of echolocation clicks have been recently proposed. The physical model includes a bottle of pressurized air connected to the atmosphere with an underwater rubber tube. A compressing rubber ring is placed on the underwater portion of the tube. The ring blocks the air jet passing through the tube from the bottle. This ring can be brought into self-oscillation by the air jet. In the simplest case, the ring displacement follows a repeated triangular waveform. Because the acoustic pressure gradient is proportional to the second time derivative of the displacement, clicks arise at the bends of the displacement waveform. The mathematical model describes the dipole oscillations of a sphere "frozen" in the ring and calculates the waveform and the sound pressure of the generated clicks. The critical parameters of the mathematical model are the radius of the sphere and the peak value and duration of the triangular displacement curve. This model allows one to solve both the forward (deriving the properties of acoustic clicks from the known source parameters) and the inverse (calculating the source parameters from the acoustic data) problems. Data from click records of *Odontocetes* were used to derive both the displacement waveforms and the size of the "frozen sphere" or a structure functionally similar to it. The mathematical model predicts a maximum source level of up to 235 dB re 1  $\mu$ Pa at 1-m range when using a 5-cm radius of the "frozen" sphere and a 4-mm maximal displacement. The predicted sound pressure level is similar to that of the clicks produced by *Odontocetes*.