

УДК 551.463.597

Ю. Г. АРТЕМОВ

О РАССЕИВАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЛИЧИНОК ПУЗЫРНЫХ РЫБ

Описан эксперимент по измерению эхолотом ES-400 с рабочей частотой 38 кГц рассеивающей способности личинок пузырных рыб. При плавном увеличении глубины погружения подопытных личинок в ряде случаев наблюдался эффект резкого возрастания их рассеивающей способности. Для этих случаев выполнены измерения сечений обратного рассеяния личинок, которые оказались близкими к величинам, характеризующим рассеивающую способность значительно более крупных организмов. Обсуждаются предположения о резонансной природе отмеченного эффекта и о схожести рассеивающих свойств личинок пузырных рыб и свободных пузырьков газа.

В создании эффекта рассеяния звука в океане в диапазоне частот $2 \div 20$ кГц решающая роль принадлежит газовым пузырям рыб, попадающим в резонанс с акустическими колебаниями [1]. Позднее появились данные о том, что в океанических звукорассеивающих слоях (ЗРС) резонансный характер объемного рассеяния звука может обнаруживаться и на более высоких частотах. Этот факт связывался с наличием в составе фауны ЗРС мальков микронектонных рыб [4], однако экспериментальных данных о рассеивающей способности рыб ранних возрастных групп до настоящего времени нет.

В статье представлены результаты прямых измерений сечений обратного рассеяния (σ , м^2) личинок пузырных рыб на частоте 38 кГц.

Материал и методика. Измерения выполняли в 27-м рейсе НИС «Профессор Водяницкий» в июле — сентябре 1988 г. в глубоководных районах Черного и Эгейского морей. Для измерений применяли эхолотный комплекс ЕК-400 — ES-400 (фирма-изготовитель «Sigma D», Норвегия), оборудованный подкильной антенной с расщепленным лучом ES-38/29. Измерялась рассеивающая способность одиночных экземпляров личинок рыб, помещаемых в зону действия луча антенны эхолота (рис. 1).

Объектами измерений служили личинки рыб, отлавливаемые буксируемой макропланктонной сетью БМС на глубинах 10—120 м. В этом же диапазоне глубин личинки экспонировались при измерениях. Проведено 65 опытов. Для опытов отбирались преимущественно свежее пойманные личинки длиной 10—20 мм с плавательными пузырями диаметром 0,6—1,5 мм по внешнему контуру. В опытах использованы личинки *Syngnathus phlegon* (Syngnathidae), *Chlorophthalmus agassizi* (Chlorophthalmidae), сем. Labridae, Gobiidae, Myctophidae.

Отобранные для опытов личинки вкладывали в конверт из мельничного сита № 23 размером $2,5 \times 2,5$ см, прикрепленный к отрезку лески диаметром 1,5 мм и длиной 5 м. Одним концом леска подвешивалась к нагруженному стальному тросу диаметром 7,2 мм, на другом конце лески закреплялась образцовая цель — калибровочная медная сфера диаметром 60 мм. Измерения проводились в дрейфе, причем судно разворачивалось так, чтобы подвеска при спуске перемещалась под действием дрейфа в направлении озвучиваемого эхолотом объема. Методику измерений существенно упрощало наличие в эхолоте ES-400 режима компенсации диаграммы направленности антенны. В этом режиме эхолот принимает от антенны с расщепленным лучом дополнительную информацию об угловых отклонениях целей от акустической оси антенны, которую использует для автоматической корректировки измерений энергии эхо-сигналов с учетом характеристики направленности антенны; поэтому для проведения измерений эхолотом ES-400 требуется лишь обеспечить попадание объекта измерений в зону действия луча антенны эхолота, что в ходе опытов достигалось обычно изменением длины удерживающего подвеску троса. При этом добивались, чтобы подвеска полностью захватывалась лучом антенны, что позволяло одновременно измерять сечения рассеяния личинки и калибровочной сферы. Результаты измерений отображались в виде гистограмм функции плотности распределения силы цели $TS = 10 \log \sigma$ объектов измерений, рассчитываемых эхолотом ES-400 по данным непрерывных серий эхозондирований. Число зондирований в сериях было фиксированным (500), частота следования зондирующих посылок менялась от 83 до 125 имп/мин, длительность зондирующих импульсов 1,0 мс. Вследствие существенного различия в рассеивающей способности подопытных личинок и калибровочной сферы регистрируемые эхолотом гистограммы состояли из двух разнесенных по оси TS непе-

Рис. 1. Схема опытов по измерению рассеивающей способности личинок рыб
1 — стрела поворотная; 2 — трос; 3 — груз; 4 — конверт с подопытным объектом; 5 — калибровочная сфера; 6 — дополнительный блок; 7 — вспомогательный фал; 8 — эхолот

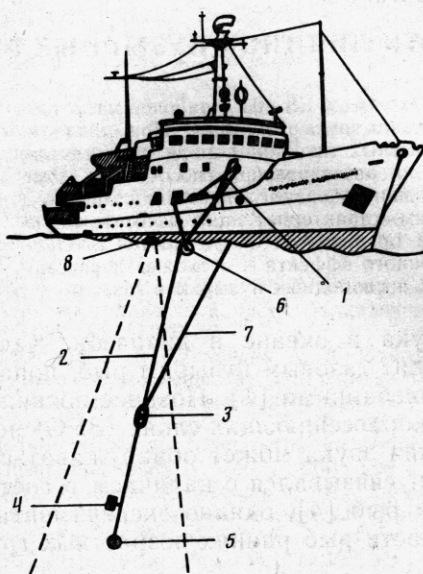


Рис. 1

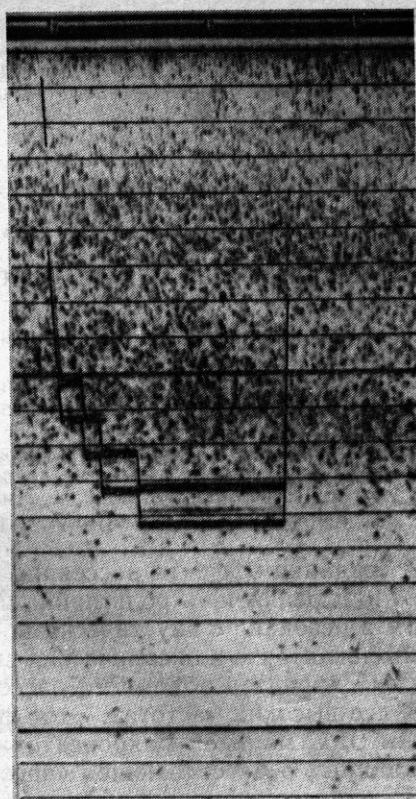


Рис. 2

ресекающихся графических участков, по отдельности изображающих функции плотности распределения TS личинки и сферы. Гистограммы TS сферы использовались для контроля правильности процедуры измерений. Результаты измерений анализировались лишь в тех случаях, когда рассчитанное по гистограмме среднее значение TS сферы не более чем на 2 дБ отличалось от паспортного значения — 33,6 дБ. Пробные спуски измерительной конструкции без личинок позволили убедиться, что никакие другие элементы подвески, помимо калибровочной сферы, эхолотом не регистрируются и не являются источниками погрешностей измерений.

Обсуждение. Особенность проводимого эксперимента состояла в том, что интенсивность эхо-сигналов от объектов измерений была, как правило, значительно ниже порога чувствительности эхолота ES-400, что делало в этих случаях измерения лишены смысла. Тем не менее в ряде опытов представилась возможность наблюдать эффект резкого возрастания интенсивности эхо-сигналов от объекта измерений до уровня, достаточного для регистрации эхолотом ES-400. Этот эффект обнаружился при плавном опускании подвески и иллюстрируется приведенной на рис. 2 эхограммой, снятой эхолотом ЕК-400 в ходе опыта по измерению рассеивающей способности личинки сем. *Myctophidae* длиной ~ 14 мм, имеющей газонаполненный плавательный пузырь эллипсоидальной формы с эквивалентным радиусом 0,55 мм. В этом опыте погружение личинки до глубины 70 м осуществлялось с горизонта 55 м с остановками через каждые 5 м. При каждой такой остановке груз и калибровочная сфера, постоянно находящиеся в луче антенны эхолота, образовывали на эхограмме характерные протяженные горизонтальные следы. Как показывает эхограмма (рис. 2), след от личинки, располагающейся между грузом и сферой, различим лишь на глубине 70 м; на верхних горизонтах подопытная личинка была акустически прозрачна. Гистограмма функции плотности распределения этой личинки на глубине 70 м изображена на рис. 3. В табл. 1 приведены результаты ряда повторных опытов. Эти данные дают основание считать, что рассеивающая способность личинок рыб с газовыми пузырями может достигать величин сечений об-

Таблица 1

Результаты измерения рассеивающей способности личинок рыб

Вид	Глубина, м	Длина личинки, мм	Радиус плавательного пузыря, мм	Мода распределения $\sigma = 10^{0,1 TS}$, м ²
Chlorophthalmus agassizi	43	18	?	$6,30 \cdot 10^{-6}$
	106	16	?	$1,33 \cdot 10^{-5}$
Gobiidae	103	16	0,66	$7,94 \cdot 10^{-6}$
	40	12	0,41	$7,08 \cdot 10^{-6}$

ратного рассеяния, свойственных более крупным организмам, таким, например, как пузырьные рыбы длиной ~ 10 см при дорсальном облучении [5]. В связи с этим представляет определенный интерес сопоставление полученных данных с теоретическими оценками рассеивающей способности малых одиночных препятствий, к которым, безусловно, следует отнести подопытных личинок.

Несмотря на то что длины подопытных личинок составляли от 1/2 до 1/4 длины акустической волны, излучаемой эхолотом, рэлеевская модель [3] в случае применения ее для описания их рассеивающих свойств вряд ли будет соответствовать действительности, поскольку тогда их сечения обратного рассеяния должны были быть ничтожно малы независимо от глубины экспозиции. Между тем наличие газонаполненных плавательных пузырей позволяет предположить, что наблюдаемый в эксперименте эффект резкого возрастания рассеивающей способности личинок обусловлен акустическим резонансом упомянутых пузырей.

У личинки, функция распределения TS которой изображена на рис. 3, эквивалентный радиус газовой полости плавательного пузыря составил, за вычетом толщины мембраны пузыря, $\sim 0,5$ мм при атмосферном давлении. Полагая, что объем газовой полости V уменьшился при возрастании статического давления P_A в ходе опыта в соответствии с законом $P_A V = \text{const}$, можно оценить радиус полости на глубине 70 м в момент измерения ее TS : $a \approx 0,25$ мм. Поскольку длина окружности газовой полости существенно меньше длины волны зондирующей посылки эхолота, для определения ее сечения обратного рассеяния применимо известное соотношение [1]:

$$\sigma = \frac{a^2 Q^2}{\left(\frac{f_p^2}{f^2} - 1\right)^2 Q^2 + \frac{f_p^2}{f^2}}, \quad (1)$$

где f — частота падающей на пузырек акустической волны; f_p — частота собственного резонанса газовой полости; Q — добротность резонатора. Интересуясь максимально возможной рассеивающей способностью газовой полости личинки, следует рассмотреть резонансное значение σ_r . В соответствии с (1), при $f = f_p$:

$$\sigma_r = a^2 Q_p^2. \quad (2)$$

В свою очередь величины f_p и Q_p зависят от физических параметров среды, окружающей полость. Ранее были получены соотношения, позволяющие оценить f_p и Q_p для свободного газового пузырька (вариант А) и плавательного пузыря рыбы, окруженного тканями тела животного (ва-

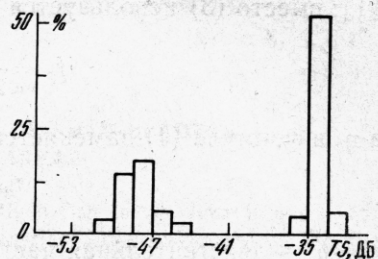


Рис. 3. Гистограмма распределения силы цели $TS = 10 \log \sigma$ личинки на глубине 70 м (слева) и калибровочной сферы (справа)

Расчетные значения акустических характеристик воздушного пузырька
радиусом 0,25 мм на глубине 70 м

Вариант расчета	Частота резонанса, f_p , кГц	Добротность, Q_p	Сечение обратного рас- сеяния, σ_p , м ²
А	35,8	20,1	$2,5 \cdot 10^{-5}$
Б	39,3	1,0	$6,3 \cdot 10^{-8}$

риант Б). Базовыми для варианта А являются следующие соотношения [3]:

$$f_p = \frac{1}{2\pi a} \sqrt{\frac{3b\beta P_A \gamma}{\rho_A}}, \quad (3)$$

$$\frac{1}{Q} = \eta_r + \eta_t + \eta_\mu, \quad (4)$$

где ρ_A — плотность воды; γ — отношение удельных теплоемкостей газа пузырька; b и β — поправки, учитывающие неадиабатичность пульсаций газа в пузырьке и поверхностное натяжение; η_r , η_t и η_μ — постоянные затухания, связанные с переизлучением, теплопроводностью и сдвиговой вязкостью воды соответственно. Вариант Б имеет следующие отличия [1]: вместо (3) используется формула

$$f_p = \frac{1}{2\pi a} \sqrt{\frac{3\gamma P_A + 4\mu_1}{\rho_A}}, \quad (5)$$

а η_μ в формуле (4) заменяется на

$$\eta_{\mu F} = \frac{4\mu_1 d}{3\gamma P_A + 4\mu_1}, \quad (6)$$

где μ_1 — действительная часть модуля сдвига тканей рыбы; d — коэффициент потерь при сдвиге.

В табл. 2 приведены оба варианта оценок f_p , Q_p и σ_p для воздушного пузырька таких же, как у подопытной личинки, размеров. Расчет по варианту А выполнялся согласно методике [3]. Относительно величины μ_1 при расчете оценки f_p по варианту Б приняты те же предположения, что и в [2]. Оценка Q_p для этого варианта не рассчитывалась, а воспроизведена из [2]. Данные табл. 2 показывают, что обе оценки для f_p близки к рабочей частоте эхолота $f=38$ кГц; следовательно, предположение о резонансном характере рассеяния зондирующей посылки эхолота подопытной личинкой не лишено оснований. Что же касается σ_p , то ее оценка по варианту Б принципиально расходится с результатами измерений, а оценка по варианту А принадлежит интервалу возможных значений, приведенных на рис. 3. Сравнение использованных методик расчета показывает, что расхождение расчетных величин σ_p обусловлено различием оценок Q_p , причем формулы для расчета Q_p по вариантам А и Б различаются лишь в части определения вязкостных потерь. Это обстоятельство позволяет предположить, что причиной обнаруженного сходства рассеивающей способности личинок и свободных пузырьков газа является близость значений коэффициента вязкости тканей личинок рыб при частоте облучения 38 кГц и вязкости морской воды, ничтожно малой по сравнению с вязкостью тканей взрослых рыб. В пользу такого предположения свидетельствует и тот, на первый взгляд очевидный, факт, что модуль сдвиговой упругости тканей личинок рыб с неразвитыми скелетом и кожей значительно меньше модуля сдвиговой упругости тканей взрослых рыб и даже мальков. В процессе морфогенеза личинок их тела становятся более прочными и упругими, что, вероятно, приводит в итоге к уменьшению добротности их газонаполненных плавательных пузырей до типичных для взрослых рыб величин $4 \div 6$ [1].

Разумеется, наши материалы требуют дальнейших уточнений и не позволяют с достаточной определенностью уяснить физический смысл наблюдаемого в эксперименте резкого возрастания рассеивающей способности личинок. Тем не менее результаты проведенных измерений дают основание полагать, что личинки рыб с газовыми пузырями, имеющими резонанс на частотах порядка десятков килогерц, могут создавать в океане, подобно свободным пузырькам газа, заметные акустические эффекты.

Автор благодарит В. Е. Заику, впервые высказавшего идею эксперимента и способствовавшего его проведению, В. В. Мельникова за предоставленный материал для опытов, И. Ю. Еремина, Т. Н. Климову, Т. В. Михайлову, Н. В. Малиночку, Н. И. Иванову и Т. М. Рогач за помощь в проведении опытов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреева И. Б. Рассеяние звука в океанических звукорассеивающих слоях//Акустика океана. М.: Наука, 1974. С. 493—558.
2. Андреева И. Б., Самоволькин В. Г. Рассеяние акустических волн на морских организмах. М.: Агропромиздат, 1986. С. 93—98.
3. Клей К., Медвин Г. Акустическая океанография. М.: Мир, 1980. 580 с.
4. Мозговой В. А. Исследование объемного рассеяния ультразвуковых волн в восточной Атлантике//Океанология. 1983. Т. 23. № 5. С. 420—427.
5. Nakken O., Olsen K. Target strength measurement of fish//Rapp. P.—V. Reun. Cons. int. Expol. Mer. V. 170. P. 52—69.

Институт биологии южных морей
АН УССР, Севастополь

Поступила в редакцию
24.V.1989

Yu. G. ARTYOMOV

ON SOUND-SCATTERING ABILITY OF SWIM-BLADDER CONTAINED FISH LARVAE

The experiment on study of swim-bladder contained fish larvae reflecting properties with assistance of 38 kHz echosounder ES-400 is described. It was recognized the effect of larvae reflecting properties sharp increasing caused by slow depth increasing. Larvae back scattering cross section values, was measured in such cases, are like those peculiar to significant grater organisms. Some reasons in favour of assumptions of resonance nature of marked above effect and of likeness of reflecting properties of swim — bladder contained fish larvae and bubbles are presented.