

О рассеянии высокочастотного звука в верхнем слое океана

В. А. Буланов* А. В. Стороженко†

Тихоокеанский океанологический институт имени В. И. Ильичева Дальневосточного отделения РАН

Россия, 690041, Владивосток, ул. Балтийская, д. 43

(Статья поступила 28.07.2019; Подписана в печать 20.09.2019)

Представлены результаты исследований рассеяния звука в верхнем слое для различных районов океана и выявлены основные отличия рассеяния звука в верхнем слое арктических морей и в экваториальных и средних широтах океана. Проанализированы особенности распределения звукорассеивающих слоев на шельфе Японского моря в различные сезоны года. Одновременные исследования рассеяния звука и сетные обловы планктона *in situ* позволили выявить взаимосвязи между рассеянием высокочастотного звука и распределением зоопланктона.

PACS: 43.30.Ft, 43.30.Gv, 43.30.Hw

УДК: 534.22; 551.46

Ключевые слова: рассеяние звука, планктон.

ВВЕДЕНИЕ

Рассеяние звука в море изменяется в широких пространственно временных масштабах под действием биологических и внешних факторов. Только современными акустическими методами зондирования на основе обратного рассеяния звука могут быть зарегистрированы резкие временные изменения параметров морской среды, а также пространственные вариации параметров среды [1]. Большую роль в рассеянии звука играют планктонные сообщества и ведущее место в иерархии рассеяния занимают различные виды зоопланктона [1–5]. С конца 1980-х годов появился ряд моделей [1, 3], которые позволяют по достаточно простым формулам вычислить коэффициент рассеяния звука на больших и сложных по форме одиночных объектах, например, на слабо изогнутых цилиндрах конечной длины. В этом случае удается оценить коэффициент рассеяния не только рыбами и планктоном малого размера (меньше длины волны звука), но и большими рыбами и зоопланктоном, наиболее сильно рассеивающими звук. Выяснилось, что на высоких частотах звука основное рассеяние звука имеет биологическое происхождение и значительная часть его связана с распределением планктона в морской воде [2–4]. Основу работы составляет решение практического вопроса об оценке распределения биомассы в деятельном слое океана по данным о рассеянии звука. Измерения коэффициентов рассеяния звука проводились на ходу судна и на отдельных станциях на высоких частотах от 100 до 250 кГц в различные годы с 2000 по 2016 гг. Исследования проводились в Японском и Охотском морях, в северо-западной части Тихого океана и в морях восточной Арктики.

1. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАССЕЯНИЯ ЗВУКА

На практике рассеяние звука определяется коэффициентом рассеяния, экспериментальное значение которого можно написать в виде [1–3]

$$m_V = (2/\pi\theta^2 c\tau) (P_{bs}/P_i)^2, \quad (1)$$

где $I_{bs} \sim P_{bs}^2$, $I_i \sim P_i^2$ — интенсивности падающего на неоднородность и рассеянного звука соответственно, при этом P_i и P_{bs} — соответственно, амплитуды падающей на объем V волны и рассеянной в обратном направлении, V — импульсный рассеивающий объем среды, $V = \pi r^2 \theta^2 c\tau/2$, θ — ширина диаграммы направленности излучателя, c — скорость звука, τ — длина импульса звука.

Теоретическое выражение коэффициента рассеяния звука m_V определяется обычным выражением, учитывающим функцию распределения включений по размерам в виде:

$$m_V = \int_{l_{\min}}^{l_{\max}} \sigma(l) dN(l), \quad (2)$$

где размерность сечения рассеяния σ одиночным организмом обычно задают в м^2 , и тогда размерность коэффициента m_V определяется как м^{-1} . Часто коэффициент рассеяния звука m_V записывают в логарифмической форме — в децибелах — согласно следующей формуле $S_V = 10 \lg m_V$ при этом размерность m_V берут в м^{-1} .

Можно экспериментально определить частотную зависимость $m_V(\omega)$ или $S_V(\omega)$, которая позволяет установить тип рассеивателей, а также некоторые их характеристики, например, функцию распределения по размерам $g(R)$ или массовую концентрацию m_g , определяемую в виде

$$m_g = (4\pi/3) \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} \rho' R^3 g(R) dR, \quad (3)$$

*E-mail: bulanov@poi.dvo.ru

†E-mail: storozhenko_and@poi.dvo.ru

где ρ' — плотность включения. Удобно также ввести в качестве характеристики звукорассеивающих слоев (ЗРС) усредненную по толщине слоя $h_{\max}$ величину коэффициента рассеяния $\overline{m_V(r)}$, а также дополнительно по глубине согласно следующих выражений:

$$\overline{m_V(r)} = \frac{1}{h_{\max}} \left[\int_0^{h_{\max}} m_V(r, z) dz \right], \quad (4)$$

$$\overline{\overline{m_V}} = \frac{1}{L h_{\max}} \int_0^L \int_0^{h_{\max}} m_V(r, z) dz dr.$$

2. РАССЕЯНИЕ ЗВУКА И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛАНКТОНА НА ШЕЛЬФЕ

Охарактеризуем наиболее типичные результаты, полученные в заливе Петра Великого Японского моря на трассе протяженностью до 100 км в различные сезоны. На рис. 1 представлено распределение рассеяния звука вдоль трассы в летний период — 23.08.2011. Видно, что плотность ЗРС распределена крайне неравномерно вдоль трассы и $\overline{m_V(r)}$ изменяется на 2 порядка от $5 \times 10^{-10} \text{ м}^{-1}$ до $2 \times 10^{-8} \text{ м}^{-1}$.

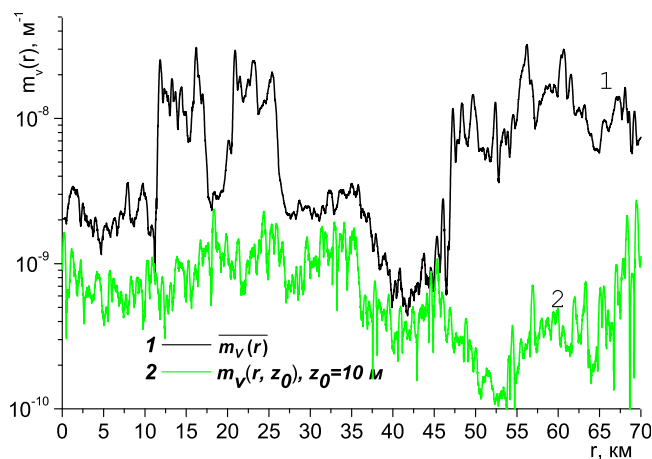


Рис. 1: Распределение рассеяния звука вдоль трассы на шельфе Японского моря: горизонтальный профиль $\overline{m_V(r)}$ и профиль $m_V(r, z_0)$ на глубине $z_0 = 10 \text{ м}$

Представляло интерес проанализировать вертикальное распределение рассеяния звука в различные сезоны. На рис. 2 представлены вертикальные профили $\overline{m_V(z)}$, полученные на шельфе Японского моря в различные сезоны. Можно выделить характерные сезонные особенности рассеяния. Особо следует отметить наличие мощного рассеяния в придонных слоях залива Петра Великого во все сезоны.

С целью уточнения оценок рассеяния звука на зоопланктоне, который дает основной вклад в рассеяние звука в верхнем слое моря, были проанализированы

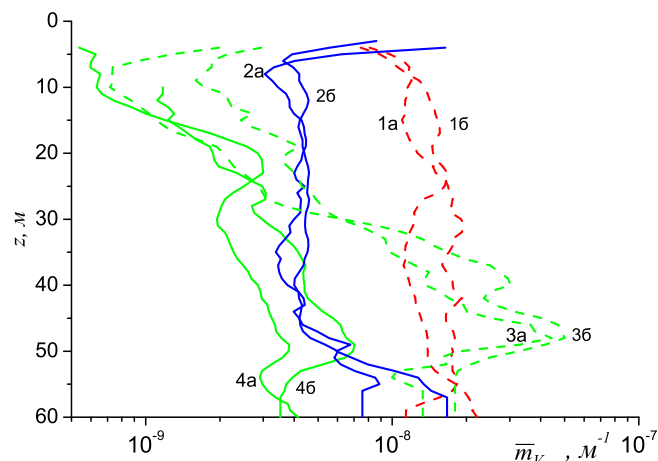


Рис. 2: Распределение $\overline{m_V(z)}$ в заливе Петра Великого Японского моря для различных сезонов 2011 г.: 1,а,б — май-начало июня, 2,а,б — июнь-июль, 3,а,б — август, 4,а,б — октябрь

формулы для сечений рассеяния на отдельных особях зоопланктона в области, когда длина волны становится сравнима с характерным размером рассеивателей. В частности, было получено общее выражение, позволяющее по данным m_V получать данные по концентрации биомассы m_g в рамках двух распределений — степенного и гауссовского:

$$m_g^{(P,G)}(r, f) = D^{(P,G)}(f) m_v(r, f). \quad (5)$$

Коэффициент $D^{(P,G)}(f)$ имеет сложный вид, для частоты $f \sim 100 \text{ кГц}$ можно получить $D^{(P)} \sim 2 \times 10^2 \text{ г} \cdot \text{м} / \text{л}$ [4]. Приведенная величина $D^{(P)}$ в дальнейшем использована для оценки распределения биомассы в океане.

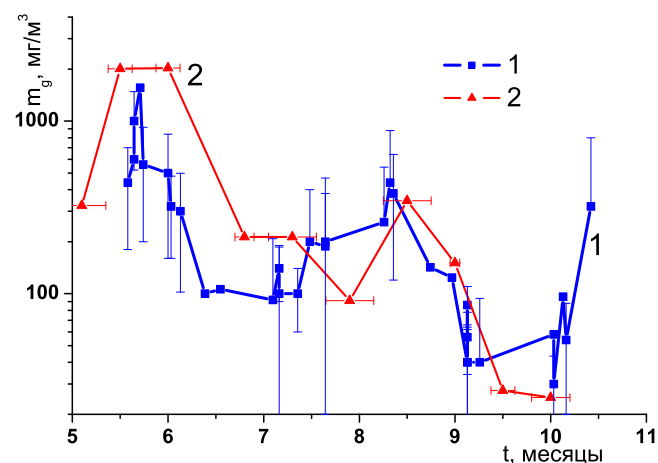


Рис. 3: Сравнение концентрации биомассы, полученных на основе рассеяния звука и в результате облова *in situ*: 1 — $m_g(r)$ по данным рассеяния звука 2008–2010 гг., 2 — $m_g(r)$ по данным облова *in situ* 1991 г.

Многочисленные данные по рассеянию звука в акватории залива Петра Великого, полученные нами в 2008–2016 гг. позволили выявить сезонную динамику зоопланктона и его распределение в заливе, а также сравнить полученные концентрации биомассы с результатами облова *in situ*. На рис. 3 представлены акустические результаты, полученные в тех же районах залива Петра Великого Японского моря, что и результаты, полученные биологами методами облова [4]. Из рис. 3 видно достаточно хорошее соответствие между акустическими данными и данными облова.

3. РАССЕЯНИЕ ЗВУКА И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛАНКТОНА В ГЛУБОКОМ ОКЕАНЕ

Типичное распределение коэффициента рассеяния звука на частоте 100 кГц вдоль трассы в тропических водах океана представлено для Аравийского моря на рис. 4, из которого видны ярко выраженные суточные вариации m_V , наложенные на тренд m_V вдоль длинной трассы на расстоянии 1500 км от юга к северу при среднем спаде 5.6 дБ. На рис. 5 представлено распределение планктона $m_g(r)$ по данным о рассеянии звука $m_V(r)$ вдоль протяженных трасс для различных районов Мирового океана, полученных в кругосветной экспедиции на ПУС «Надежда» в 2003–2004 гг. [5].

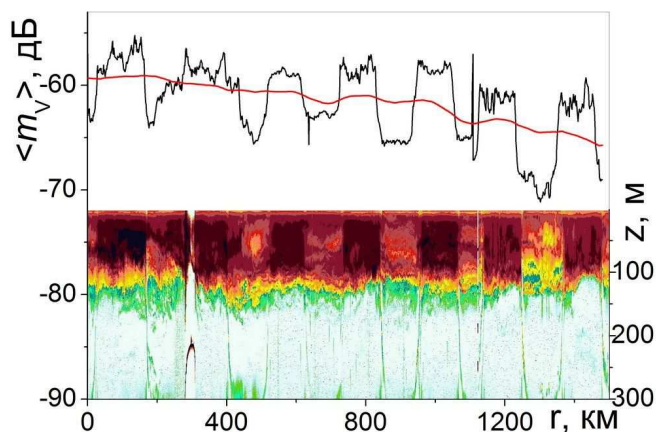


Рис. 4: Распределение $m_V(r)$ в Аравийском море

4. ОСОБЕННОСТИ СУТОЧНЫХ ВАРИАЦИЙ РАССЕЯНИЯ ЗВУКА В ОКЕАНЕ

Важной характеристикой рассеяния звука в море являются суточные вариации коэффициента рассеяния звука. В глубоководных морях на средних и экваториальных широтах обычно четко видны суточные вариации коэффициента рассеяния звука [4, 5], обусловленные суточными перемещениями планктона по глубине. На рис. 6 представлено изменение во времени коэффициента рассеяния звука на частоте 138 кГц, полученное

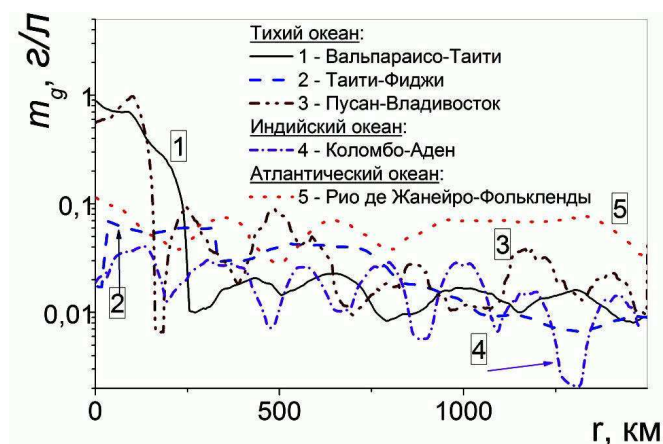


Рис. 5: Акустическая оценка распределения зоопланктона $m_g(r)$ вдоль трасс для различных районов океана

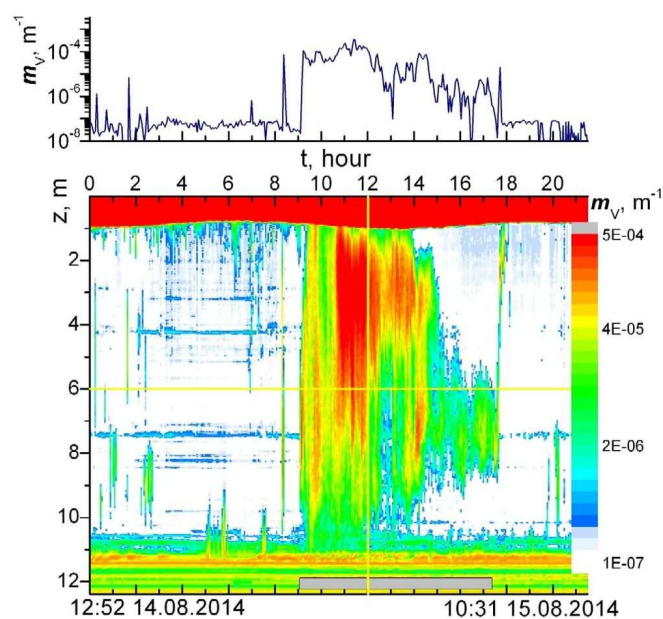


Рис. 6: Суточная изменчивость m_V на шельфе Японского моря

с помощью инвертированного излучателя, установленного на дне в шельфовой зоне Японского моря (бухта Витязь, 100 км к югу от Владивостока). Хорошо видны суточные вариации рассеяния звука и приливные вариации глубины моря. Следует отметить большую величину изменений m_V , достигающих в максимуме до 40 дБ, что существенно превышает значения вариаций m_V , полученных в глубоких морях. Проведены сравнительные исследования рассеяния звука в Японском море и восточной Арктике (Чукотское море, август 2013 г.), показанные на рис. 7.

Особый случай миграции планктона представляют результаты, полученные в Чукотском море (врезка рис. 7) и кривая 4 на рис. 7. На врезке представлена картина полусуточных вариаций звуко рассеиваю-

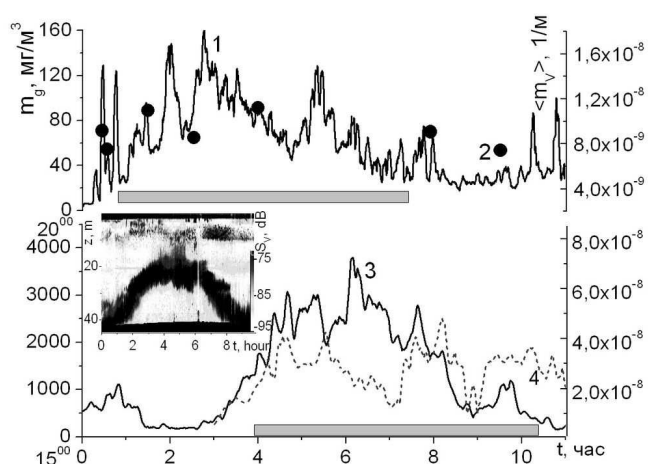


Рис. 7: Концентрация планктона в Японском море: 1 — по данным рассеяния звука, 2 — по результатам облова, и в Арктике (3 — 66° 29' N, 170° 24' W, 4 — 68° 54' N, 178° 11' W)

щих слоев на станции 4 в Чукотском море. Серым цветом на шкале времени выделено темное время суток. Исследования выявили существенно большее рассея-

ние звука в восточной Арктике, что связано с большей концентрацией планктона. Из врезки рис. 4 следует, что поведение планктона по глубине происходит иначе, неклассическим образом: в темное время суток они не приближаются к поверхности, оставаясь на глубине не менее 20 м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе акустических данных получены оценки распределения зоопланктона в Тихом, Индийском и Атлантическом океанах, которые сопоставлены с результатами, полученными в дальневосточных морях в различные годы. Анализ рассеяния звука в Японском море и восточной Арктике выявил существенно большее рассеяние звука в восточной Арктике, что предположительно связано с большей концентрацией планктона в верхних слоях арктических морей. Обнаружено, что суточная миграция планктона в Чукотском море отличается от миграции планктона в Японском море.

Работа выполнена при поддержке проекта № 15-I-1-046 программы «Дальний восток» ДВО РАН, гранта РФФИ № 16-02-00841 А.

- [1] Weibe P. H., Greene C., Stanton T. K. J. *Acoust. Soc. Am.* 1990. **88**, P. 2346.
- [2] Ressler P. *Deep-Sea Research*. 2002. I, **49**, P. 2035.
- [3] Jech J. M., Horne J. K., Chu D. et al. *J. Acoust. Soc. Am.* 2015. **138**, N 6. P. 3742.
- [4] Акуличев В. А., Буланов В. А., Стороженко А. В. ДАН,

2016. **470**, № 2, С. 219.

- [5] Bulanov V. A., Storozhenko A. V. *Proc. of Meetings on Acoustic*. 2016. **24**, 005006.
- [6] Касьян В. В. *Биология моря*. 2004. **30**, № 2. С. 87.

On the scattering of high frequency sound in the upper layer of the ocean

V. A. Bulanov^a, A. V. Storozhenko^b

V.I.Ilichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of RAS. Vladivostok 690041, Russia

E-mail: ^abulanov@poi.dvo.ru, ^bstorozhenko_and@poi.dvo.ru

The results of researches of sound scattering in the upper layer for different regions of the ocean are presented and the main differences of sound scattering in the upper layer of the Arctic seas and in the Equatorial and mid-latitude ocean are shown. The features of distribution of sound-scattering layers on the continental shelf of the Sea of Japan in different seasons of the year were analyzed. Simultaneous studies of sound scattering and netting the fish collection of the plankton in situ allowed us to identify the relationship between the scattering of high frequency sound and distribution of zooplankton.

PACS: 43.30.Ft, 43.30.Gv, 43.30.Hw

Keywords: sound scattering, plankton.

Received 28 July 2017.

Сведения об авторах

1. Буланов Владимир Алексеевич — доктор физ.-мат. наук, заведующий лабораторией гидрофизики; тел.: (423) 237-49-13, e-mail: bulanov@poi.dvo.ru.
2. Стороженко Андрей Викторович — науч. сотрудник; тел.: (423) 237-49-13, e-mail: storozhenko_and@poi.dvo.ru.