РАССЕЯНИЕ И ОТРАЖЕНИЕ ЗВУКА

УДК 534.222.2; 551.463.2

DOI: 10.29006/978-5-9901449-5-8-7

В.А. Буланов, И.В. Корсков, А.В. Стороженко

ОСОБЕННОСТИ РАССЕЯНИЯ ЗВУКА В ВЕРХНЕМ СЛОЕ МОРЕЙ СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ТИХОГО ОКЕАНА

*Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева
Россия, 690041 Владивосток, Балтийская, 43, Тел.: (423) 237-4913;*

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

i_korskov@poi.dvo.ru; storozhenko_and@poi.dvo.ru

Представлены результаты исследований рассеяния звука в верхнем слое морской воды в различных районах океана. Измерения коэффициентов рассеяния звука проводились на ходу судна на частотах от 12 до 100 кГц. Исследования представляли интерес в связи с возможностью оперативно, в процессе движения судна, проводить мониторинг изменчивости структуры морской среды. Показаны возможности и проведены оценки биомассы вдоль длинных трасс в различных морях на основе рассеяния звука.

Ключевые слова: рассеяние звука, верхний слой моря, биомасса

Наиболее изменчивым слоем водной толщи океана является верхний слой. Для этого слоя характерно сосредоточение биоресурсов и наличие интенсивных динамических процессов [1–3]. Исследования рассеяния звука позволяют изучать мелкомасштабную структуру морской среды и ее изменчивость. Большую роль в рассеянии звука играют планктонные сообщества и, в первую очередь, с позиции иерархии сечения рассеяния звука одиночным объектом выступает особь зоопланктона. Фитопланктон рассеивает звук существенно слабее, однако наличие его в больших количествах, порой, создает конкуренцию зоопланктону в рассеянии звука на высоких частотах. Аномальное рассеяние звука на планктоне и других микронеоднородностях, локализованных вблизи термоклина,

позволяет получать информацию о различных гидрофизических процессах в море – внутренних волнах, течениях и крупномасштабной турбулентности [1, 4].

Коэффициент объемного рассеяния звука m_V определяется выражением, учитывающим функцию распределения по размерам $g(R)$ и сечение рассеяния $\sigma(R, \omega)$ одиночным включением, и экспериментально $m_V|_{\text{exp}}$ может быть измерено с помощью следующей формулы [1, 4]:

$$m_V = \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} \sigma(R, \omega) g(R) dR = m_V|_{\text{exp}} \approx (2 / \pi \theta^2 c \tau) (P_{bs} / P_i)^2, \quad (1)$$

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, $V = \pi r^2 \theta^2 c \tau / 2$, где θ – ширина диаграммы направленности излучателя, c – скорость звука, τ – длина импульса звука. В конце 1980 гг. появились модели [2, 3], которые позволяют оценить коэффициент рассеяния звука как планктоном малого размера, так и большим зоопланктоном и рыбами. С помощью формулы (1) можно определить концентрацию биомассы по формуле [4, 5]:

$$m_g(r) = (4\pi / 3) \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} \rho'(r) R^3 g(R, r) dR, \quad (2)$$

где $\rho'(r)$ – плотность включений в различных точках пространства. Общее выражение, позволяющее получать данные по распределению биомассы в рамках степенного P и гауссовского G распределений, имеет вид [4, 5]:

$$m_g^{(P,G)}(r, f) = D^{(P,G)}(f) m_V(r, f), \quad (3)$$

где коэффициент $D^{(P,G)}(f)$ подробно проанализирован в работе [5].

Целенаправленные эксперименты по изучению рассеяния звука в верхнем слое океана в ТОИ ДВО РАН первоначально проводились на НИС «Акад. А. Виноградов». Схема экспедиций представлена на рис. 1а. На рис. 1б представлена картина рассеяния звука на частоте 12 кГц вдоль трассы в северной части Южно-Китайского моря на расстоянии около 320 км. Одновременно с пространственной изменчивостью рассеяния звука наблюдались суточные вариации звукорассеивающих слоев, которые в темное время суток поднимаются к поверхности.

В 2003 и 2004 гг. в Южно-Китайском море были проведены исследования рассеяния звука на частоте 100 кГц вдоль маршрута следования

Рис. 1. а) Схема маршрутов экспедиций, в которых проходили исследования по рассеянию звука в Южно-Китайском море; б) Рассеяние звука на частоте 12 кГц на звукорассеивающих слоях в Южно-Китайском море.

парусного судна «Надежда», совершающего кругосветную экспедицию. Осенью 2019 г. в 88 рейсе НИС «Акад. М.А. Лаврентьев» были проведены исследования рассеяния звука на частоте 25 кГц. На рис. 2а представлена картина рассеяния звука в верхнем слое, полученная на судне «Надежда» в 2003 г. в глубоководной части Южно-Китайского моря. На рис. 2б представлено распределение коэффициента рассеяния звука m_v на частоте 25 кГц вдоль протяженной трассы 396 км в центральной части Южно-Китайского моря. На правом графике рис. 2б – $m_v(z)$ при $r = 113$ км, вверху – $m_v(r)$ на различных глубинах: 1 – $z = 80$ м, 2 – $\langle m_v(r) \rangle$ по глубине от 0 до 200 м, 3 – $z = 920$ м. Из рис. 2 видны суточные вариации коэффициента рассеяния звука, которые связаны с суточными перемещениями по глубине планктона и рыбы. На частоте 25 кГц удается получить данные по рассеянию звука на биологических объектах до значительных глубин, более 1 км непосредственно на ходу судна.

Рис. 2. а) Коэффициент рассеяния звука m_v на частоте 100 кГц вдоль трассы в феврале 2003 г. в центральной части Южно-Китайского моря; б) Коэффициент рассеяния звука m_v на частоте 25 кГц вдоль трассы в центральной части Южно-Китайского моря.

На рис. 3а представлено распределение коэффициента рассеяния звука на частоте 100 кГц вдоль трассы длиной около 900 км в водах Охотского моря. Видны суточные вариации m_v , достигающие 20 дБ, наложенные на тренд m_v , достигающий 5–6 дБ. Основные суточные вариации m_v для Охотского и Южно-Китайского моря в среднем схожи на частоте 100 кГц, но отличаются по сравнению с частотой 25 кГц, для которой суточная изменчивость рассеяния звука достигает больших глубин 1000–1200 м. На рис. 3б представлены сравнительные

Рис. 3. а) Распределение рассеяния звука вдоль трасс в Охотском море; б) Концентрация планктона по данным о рассеянии звука для различных районов Мирового океана (по данным кругосветной экспедиции на ПУС «Надежда» в 2003–2004 гг., кривые 1, 2, 3, 5 – фрагменты одной и той же протяженностью для трасс с переменной длиной) и данных НИС «Акад. М.А. Лаврентьев» в 2019 г. (кривые 5).

акустические оценки концентрации планктона, полученные в 2003–2004 гг. в кругосветной экспедиции на судне «Надежда», а также в ноябре 2019 г. в 88 рейсе НИС «Академик М.А. Лаврентьев». Видно, что в открытом океане средняя концентрация планктона примерно одинакова в различных районах, включая суточные вариации концентрации планктона в открытых частях океана. Концентрация планктона возрастает вблизи островов в тропической части океана и в окраинных морях, что согласуется с результатами различных авторов [4, 5]. Полученные зависимости, связывающие коэффициент рассеяния звука m_v и распределение биомассы в морской среде, представляют интерес для использования их для оперативного акустического мониторинга биоресурсов на ходу судна.

Работа выполнена по госзаданию №0271-2019-0009 и частично поддержана грантами РФФИ № 17-02-00561а и программы «Дальний Восток» № 18-I-004.

Литература

1. Андреева И.Б. Звукорассеивающие слои – акустические неоднородности толщи вод океана // Акуст. журн. 1999. Т. 45. № 4. С. 437–444.

2. Lavery A.C., Wiebe P.H., Stanton T.K., et al. Determining dominant scatterers of sound in mixed zooplankton populations // J. Acoust. Soc. Am. 2007. Vol. 122. P. 3304–3326.
3. Jech J.M., Horne J.K., Chu D., et al. Comparisons among ten models of acoustic backscattering used in aquatic ecosystem research // J. Acoust. Soc. Am. 2015. Vol. 138. No. 6. P. 3742–3764.
4. Акуличев В.А., Буланов В.А. Акустические исследования мелкомасштабных неоднородностей в морской среде. Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 2017. 414 с. <https://www.poi.dvo.ru/node/470>.
5. Акуличев В.А., Буланов В.А., Storozhenko A.V. Акустические исследования зоопланктона в Японском море и восточной Арктике // ДАН. 2016. 470. № 2. С. 972–975.

V.A. Bulanov, I.V. Korskov, A.V. Storozhenko

FEATURES OF SOUND SCATTERING IN THE UPPER SEA LAYER OF THE NORTHWESTERN PACIFIC OCEAN

V. I. Ilyichev Pacific Oceanological Institute

43 Baltiyskaya str., Vladivostok, 690041, Russia

Tel.: (423) 237-4913; E-mail: bulanov@poi.dvo.ru; i_korskov@poi.dvo.ru; storozhenko_and@poi.dvo.ru

The results of studies of sound scattering in the upper layer of seawater in various regions of the ocean are presented. Sound scattering coefficients were measured while the ship was moving at frequencies from 12 to 100 kHz. The research was of interest in connection with the ability to monitor changes in the structure of the marine environment quickly during the movement of the vessel. The possibilities are shown and estimates of biomass along long routes in various seas are made based on sound scattering.

Keywords: sound scattering, upper layer of the sea, biomass

Acknowledgment: The work was carried out according to state assignment No. 0271-2019-0009 and partially under supported by grants from the Russian Foundation for Basic Research No. 17-02-00561a and the program «Far East» No. 18-I-004.

References

1. Andreeva I.B. Sound scattering layers as acoustic inhomogeneities in the ocean. *Acoustical Physics*, 1999, Vol. 45, No. 4, pp. 385–392.
2. Lavery A.C., Wiebe P.H., Stanton T.K., et al. Determining dominant scatterers of sound in mixed zooplankton populations. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2007, Vol. 122, pp. 3304–3326.
3. Jech J.M., Horne J.K., Chu D., et al. Comparisons among ten models of acoustic backscattering used in aquatic ecosystem research. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2015, Vol. 138, No. 6, pp. 3742–3764.
4. Akulich V.A. and Bulanov V.A. Acoustic study of small-scale heterogeneities in the marine environment. Vladivostok: POI FEB RAS, 2017, 414 p., ISBN 978-5-9909943-8-6, <https://www.poi.dvo.ru/node/470>.
5. Akulich V.A., Bulanov V.A., and Storozhenko A.V. Acoustic studies of zooplankton in the Sea of Japan and Eastern Arctic. *Doklady Earth Sciences*, 2016, Vol. 470, No. 1, pp. 972–975.