ПРИМЕНЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ВЕРХНЕГО СЛОЯ ОКЕАНА

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

*Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного
отделения РАН Владивосток, 690041, ул. Балтийская, д.43*

Тел.: (423)2374913; Факс: (423)2312573, e-mail: bulanov@poi.dvo.ru

The possibilities of using nonlinear acoustic methods for studying the upper layer of the ocean are discussed. The relationship is shown and the results of studying the distribution of acoustic nonlinearity and sound absorption in the ocean and in the shallow sea on the basis of remote data on sound backscattering are presented.

Создание эффективных методов для изучения верхнего слоя океана является актуальной задачей современной океанологии [1, 2]. В последнее время возникла необходимость разработки методов, обладающих высоким пространственным и временным разрешением, включая применение методов дистанционного зондирования [1, 3]. Таковыми оказались линейные акустические методы зондирования, а также методы, использующие анализ нестационарных и нелинейных эффектов рассеяния и распространения звука в жидкостях [4].

В настоящей работе обсуждены возможности применения нелинейных акустических методов для исследования верхнего слоя океана на примере изучения структуры приповерхностного пузырькового слоя океана. В морской воде всегда присутствуют газовые пузырьки и особенно велика их роль при больших скоростях ветра и при сильном ветровом волнении [2, 3], при этом пузырьки могут затягиваться до больших глубин [3]. Для определения акустических характеристик верхнего слоя морской воды важен вид функции распределения пузырьков по размерам $g(R)$ в возможно более широкой области изменения радиусов R . Функция $g(R)$ обычно определяется как количество включений в единице объема dN , приходящихся на интервал их радиусов dR , т.е. $g(R) = dN / dR$ [2]. Данные по рассеянию звука на различных частотах в приповерхностном слое моря позволили выявить структуру распределения по размерам пузырьков и их динамику [4].

Для исследования рассеяния звука была произведена постановка акустической системы излучения-приема, включающей донную станцию и аппаратуру регистрации и анализа сигналов, располагающейся на береговом посту. Донная станция включает в себя следующие излучатели: трехэлементный пьезокерамический излучатель с резонансными частотами 138, 216 и 519 кГц, параметрический двухэлементный излучатель с частотами 300 и 50 кГц, излучатель с резонансной частотой 145 кГц.

Рис. 1. Рассеяние звука частоты 145 кГц на пузырьках и планктоне в течение суток в октябре 2017 г.

На рис. 1 показано типичное распределение коэффициента объемного рассеяния звука $m_v(z, t)$ в зависимости от глубины z и времени t на пузырьках и планктоне, полученные на частоте 145 кГц в течение суток в октябре 2017 г. Серым цветом на оси времени t отмечен ночной период, когда планктон проявляется наиболее ярко. На рис. 2 показана

Рис. 2. Детали пространственно-временной структуры рассеяния звука на пузырьках и планктоне.

ны некоторые детали пространственно-временной структуры рассеяния звука на пузырьках и планктоне, из которых можно видеть характерные времена изменения пузырьковых облаков (от 30 до 60 секунд), а также периоды волнового движения, в котором участвуют планктонные объекты (около 2–3 минут).

Функция распределения пузырьков по размерам $g(R)$ может быть найдена по частотной зависимости коэффициента рассеяния звука $m_V(\omega)$ в предположении, что основной вклад в рассеяние звука вносят резонансные пузырьки, радиус которых связан с частотой по формуле Миннерта [3, 4]:

$$g(R(\omega)) = \frac{2\delta_\omega}{\pi R^3(\omega)} m_V(\omega), \quad R(\omega) = \sqrt{3\gamma P_0 / \rho} / \omega,$$

где d_w – коэффициент резонансного затухания [4] на частоте ω , P_0 – гидростатическое давление, ρ и γ – плотность жидкости и постоянная адиабаты газа. Полученные с помощью рассеяния звука данные по концентрации пузырьков в приповерхностных слоях моря позволяют определить эффективную акустическую нелинейность ε_e , которая обычно превышает нелинейность ε воды без включений,

$$\frac{\varepsilon_e}{\varepsilon} \approx \left(1 + \frac{2\pi}{3} \frac{(\gamma+1)\tilde{\beta}^2}{\varepsilon} \int_0^\infty dR R^3 g(R) \right) \left[1 + \tilde{\beta} \int_0^\infty \frac{R^3 g(R) dR}{1 - (R/R_\omega)^2 (1 + i\delta_\omega)} \right]^{-2},$$

где $\tilde{\beta} = \rho c^2 / \gamma P_0$, c – скорость звука, а также дополнительное затухание звука, обусловленное распределенными в воде пузырьками:

$$\alpha \approx (\omega / c) \operatorname{Im} \left\{ 1 + (4\pi / 3) \tilde{\beta} \int_0^\infty dR g(R) R^3 / [1 - (R/R_\omega)^2 (1 + i\delta_\omega)] \right\}^{1/2}.$$

На рис. 3 представлены изменения во времени концентрации пузырьков, коэффициента поглощения звука на частоте 138 кГц, и параметра акустической нелинейности морской воды в приповерхностном слое пузырьков. Видно, что перечисленные акустические параметры изменяются в широких пределах при обрушениях поверхностных волн и сильном ветре, приводящим к модуляциям акустических свойств в приповерхностном слое моря.

Рис. 3. Изменение во времени и проявление взаимосвязи акустической нелинейности ϵ , поглощения звука α и распределения пузырьков на глубине z , отмеченной горизонтальной линией на нижнем рисунке, в приповерхностном слое моря при изменении силы ветра.

Таким образом, в работе обсуждено применение нелинейных акустических методов для изучения структуры верхнего слоя океана и показана возможность прогнозирования распределения акустической нелинейности и поглощения звука в океане на основе данных по рассеянию звука.

Работа выполнена при поддержке проектов №17-02-00561 РФФИ и №18-I-004 программы ДВО РАН «Дальний Восток».

ЛИТЕРАТУРА

1. Есипов И.Б., Рыбак С.А., Серебряный А.Н. Нелинейная акустическая диагностика земных пород и океана // УФН. 2006. Т. 176. № 1. С. 102–108.
2. Garrett C., Li M., Farmer D. The Connection between Bubble Size Spectra and Energy Dissipation Rates in the Upper Ocean // J. Phys. Ocean. 2000. Vol. 30. No. 9. P. 2163–2171.
3. Baschek B., Farmer D.M. Gas Bubbles as Oceanographic Tracers // J. Atm. and Ocean. Techn. Vol. 27. P. 241–245.
4. Акуличев В.А., Буланов В.А. Акустические исследования мелкомасштабных неоднородностей в морской среде: Владивосток: ТОИ ДВО РАН. 2017. 414 с.