

## ОБ ИССЛЕДОВАНИИ РАССЕЙЯНИЯ ЗВУКА В ВЕРХНЕМ СЛОЕ ЯПОНСКОГО МОРЯ

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

*Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева, г.Владивосток  
bulanov@poi.dvo.ru; i\_korskov@poi.dvo.ru; storozhenko\_and@mail.ru*

Приповерхностный слой океана характеризуется развитой турбулентностью, аномально высокими концентрациями газовых пузырьков, газонасыщенностью воды и большим газообменом между океаном и атмосферой. [1, 2]. В 1980-х гг. были открыты новые объекты в океане – подводные газовые (пузырьковые) факелы, образованные газовыми пузырьками, выходящими из дна моря [3,4]. Подводные газовые факелы (ГФ) повсеместно встречаются в районах выброса газов вблизи подводных грязевых вулканических образований, подводных газовых и нефтяных месторождений, подводных залежей газогидратов в толще морских осадков и др. Большую роль для обнаружения ГФ и изучения их структуры играют акустические методы зондирования на основе обратного рассеяния звука [2].

Основная цель настоящей работы заключалась в исследованиях рассеяния звука во взаимосвязи с распределением пузырьков в приповерхностном слое моря и в подводных газовых факелах, исходящих из дна и все чаще встречающихся в различных районах океана.

Основной платформой для проведения измерений явились гидроакустические излучатели с частотами 12.4 кГц и 200 кГц. Планомерные исследования были проведены в рейсе 81 НИС «Профессор Гагаринский» с 1.08 по 13.08.2022 г. Для работы на частоте 12,4 кГц использовалась аппаратура лаборатории гидрофизики ТОИ ДВО РАН и излучатель глубоководного эхолота ГЭЛ-3, вмонтированный в днище судна, что позволяло проводить непрерывное зондирование моря непосредственно на ходу судна. Для исследований на частоте 200 кГц использовался комплекс на основе гидролокатора “Black Vox Fish Finder” фирмы “Interphase”, который опускался с борта судна и применялся при работе в дрейфе судна.

На рис. 1 показана функциональная схема аппаратного комплекса для измерения на частоте 12.4 кГц. Генератор синхроимпульсов задавал интервалы между посылками импульсов. В зависимости от глубины места интервалы менялись от 1 до 3.7 с. Генератор сигналов ГСПФ-053 формировал импульсы с частотой 12.4 кГц длительностью от 1 до 4 мс. Для усиления сигналов использовался усилитель мощности фирмы



Рис. 1. Функциональная схема аппаратного комплекса для измерения рассеяния звука на частоте 12.4 кГц.

Behringer, NX6000D, мощностью 6 кВт. Излучатель ГЭЛ-3 имеет характеристику направленности  $10^0$ , чувствительность на приеме 300 мкВ/Па. В основе приемного тракта входил селективный нановольтметр SN 233, который обеспечивал усиление  $10^4$  при фильтрации сигналов в зависимости от длительности импульсов и дальности в различной полосе 54, 36 и 18 дБ/октаву, усиленный сигнал оцифровывался 12 разрядной АЦП L873 фирмы Л-Кард (Москва) с максимальной частотой оцифровки до 1.3 МГц, а также с помощью 14 разрядной АЦП Ла2-USB фирмы Руднев и Шиляев (Москва).

Основа акустического метода регистрации и изучения неоднородностей в водной толще заключается в применении импульсных акустических сигналов с целью их приема спустя определенное время после момента излучения, которое несет информацию о расстоянии, на котором находится рассеивающий объект. Совокупность принятых сигналов позволяет в дальнейшем решать обратную задачу восстановления структуры рассеивающего объекта [1, 2]. Имея информацию об амплитудах падающей на объем  $V$  волны  $P_i$  и рассеянной в обратном направлении  $P_{bs}$  можно в приближении однократного рассеяния (борновском приближении) определить коэффициент объемного рассеяния  $m_V$  в виде :

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

где  $\theta$  – ширина характеристики направленности излучателя,  $c$  – скорость звука,  $\tau$  – длительность импульса звука,  $P_i(z) = A \exp(-\alpha z) / z$ ,  $A$  – калибровочное значение амплитуды излучаемого звука,  $\alpha$  – коэффициент поглощения звука, когда поглощение звука на расстоянии  $z$  невелико,  $P_i(z) \approx A / z$ . Величина  $P_{bs}$  измеряется непосредственно в эксперименте.

По частотной зависимости коэффициента рассеяния звука  $m_V(\omega)$  может быть найдена функция распределения пузырьков по размерам  $g(R)$  в предположении, что основной вклад в рассеяние звука вносят резонансные пузырьки, радиус которых связан с частотой по формуле Миннерта [2]:

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

где  $Q_\omega$  – добротность пузырьков на циклической частоте  $\omega = 2\pi f$ . Полученные данные позволили получить функции распределения пузырьков по размерам.

На рис. 2 приведены результаты по рассеянию звука на частотах 12 и 200 кГц с данными гидрологического зондирования на якорной стоянке в течение 8 часов вблизи о. Сахалин. при переходе ночь-день (стоянка на якорю вблизи п. Чехов, о. Сахалин). Хорошо видны суточные вариации коэффициента рассеяния звука при вариациях планктонных слоев в толще моря – всплытие в ночной период и заглубление дневной период. Видно, что на всех рисунках планктонные слои в равновесном состоянии ночью устремляются на границу пикноклина, располагающегося примерно на 20 м. На высокой частоте также хорошо видно рассеяние на стаях рыб, планктоне и приповерхностный мощный звукорассеивающий слой. Наличие большой реверберации на низкой частоте не удалось выявить рассеяние звука на структурах, располагающихся на небольших глубинах. В целом можно видеть, что картина распределения коэффициента рассеяния звука до определенной степени повторяет картину расположения пикноклина и залегание подводного звукового канала.

Аналогичная функциональная схема аппаратурного комплекса использовалась в экспедиции НИС «Профессор Гагаринский» (рейс № 83, 20–23.10.2022 г.) для измерения рассеяния звука частоты 12.4 кГц и регистрации подводных пузырьковых факелов в заливе Петра Великого Японского моря. На рис. 3а представлена схема расположения подво-

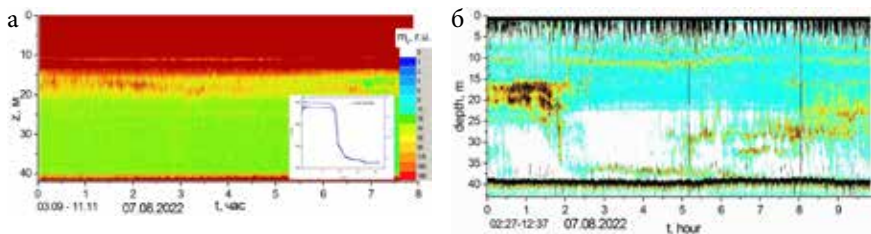


Рис. 2. Изменения коэффициента рассеяния звука  $m_V$  на частоте 12 кГц (а) и на частоте 200 кГц при переходе ночь-день (стоянка на якорю вблизи п. Чехов, о.Сахалин).

На врезке – гидрологические данные.

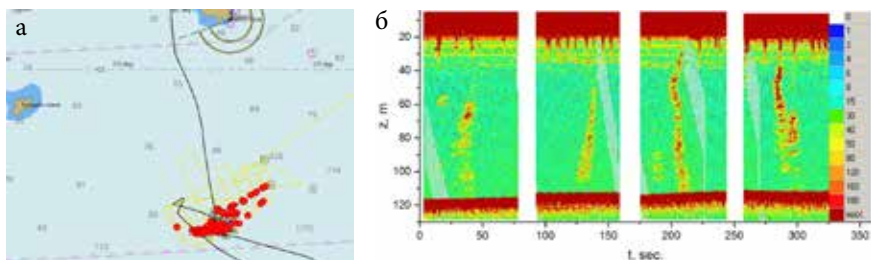


Рис. 3. Акустическая визуализация подводных пузырьковых факелов: а) схема расположения подводных газовых факелов, б) распределение коэффициента рассеяния звука частоты 12.4 кГц на пузырьковых структурах в заливе Петра Великого Японского моря в период 20–23. 10.2022 г.

дных газовых факелов, зарегистрированных с помощью рассеяния звука на частоте 12.4 кГц. Имеется подробная информация по координатам каждого факела. Наблюдалось большое количество факелов, которые располагались достаточно компактно. На рис. 3 б показано типичное распределение коэффициента рассеяния звука на пузырьковых структурах.

Таким образом, в работе представлен эффективный акустический метод на основе рассеяния звука, позволяющий на различных частотах проводить изучение структуры звукорассеивающих слоев, включая пузырьки, планктон и другие микронеоднородности морской среды. В частности продемонстрирована акустическая визуализация динамики звукорассеивающих слоев и подводных газовых факелов в заливе Петра Великого Японского моря. Показано, что применение рассеяния звука на различных частотах позволяет эффективно разделить вклад в рассеяние звука, обусловленный наличием планктона и воздушных пузырьков, и позволяет дать независимую оценку газосодержания и концентрации планктона в верхнем слое моря.

Работа выполнена по госзаданию № 0211-2021-0002 и поддержана грантом РФФИ № 22-22-00499.

### Литература

1. Vagle S., McNeil C., Steiner N. Upper ocean bubble measurements from the NE Pacific. // J. Geophys. Res. 2010. Vol. 115. C12054. 16 p. doi:10.1029/2009JC005990.
2. 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>.
3. Дмитриевский А.Н., Баланюк И.Е. Газогидраты морей и океанов. М.: ИРЦ Газпром. 2009. 416 с.
4. Judd A., Hovland M. Seabed fluid flow. The impact on geology, biology and the marine environment. Cambridge: Cambr. Univ. Press, 2007. 475 p.