

УДК 550.834.015.24

А. Э. Сиренко, Ю. В. Махнев, Ю. В. Яблокова, О. Л. Кузнецов**Оценка литологии донных отложений по спектрам широкополосных акустических сигналов**

Описан метод определения литологии донных осадков по характеристикам отраженных широкополосных акустических сигналов путем сравнения теоретических и экспериментальных спектров.

Ключевые слова: акустика морской среды, волновод, литология донных осадков, передаточная функция среды.

Об авторах

Сиренко Анна Эркиновна – аспирант кафедры общей и прикладной геофизики государственного университета «Дубна», младший научный сотрудник АО «НИИ «Атолл». E-mail: Sirenko.ann@yandex.ru. Московская обл., г. Дубна, ул. Энтузиастов, 3А, кв. 212.

Махнев Юрий Владимирович – аспирант кафедры персональной электроники государственного университета «Дубна», научный сотрудник АО «НИИ «Атолл». E-mail: vipkozlice@yandex.ru.

Яблокова Юлия Викторовна – инженер АО «НИИ «Атолл». E-mail: yulia.yablockowa@yandex.ru.

Кузнецов Олег Леонидович – доктор технических наук, профессор, Президент РАЕН, Президент государственного университета «Дубна», заведующий кафедрой общей и прикладной геофизики государственного университета «Дубна». E-mail: olk@uni-dubna.ru.

Оценка литологии и геологического строения донных отложений акваторий является актуальным направлением исследований экологической и морской геофизики особенно при строительстве подводных сооружений, прокладке нефтегазопроводов.

Литологическая оценка дна по характеристикам акустического поля будет зависеть от выбранной модели волновода и геологической среды (теоретическая модель), а также особенностей проведения натурного эксперимента (уровень шумов, аппаратурных помех и т.п.). В данной работе рассчитан теоретический спектр отраженного сигнала и сделан сравнительный анализ с экспериментальными результатами, основываясь на методике, приведенной в работах [1; 2]. Однако, в отличие от описанных экспериментов в Баренцевом море, результаты, приведенные в данной статье, были получены в условиях мелкого моря: с глубинами акватории до 18 м и расстояниями источник–приемник не более 1 км. Другим принципиальным отличием является методика регистрации акустических сигналов: в качестве приемной линии использовалась донная 24-канальная сейсмокаса протяженностью 500 м.

Суть предлагаемой авторами [1; 2] ме-

тодики заключалась в сравнении спектра зарегистрированных гидрофонами сигналов (по сути, передаточной функции среды) с теоретической передаточной функцией (для заранее выбранной модели волновода) и подборе таких параметров модели дна (коэффициента затухания α и коэффициента объемного рассеяния β , скорости продольных волн c и плотности грунта ρ), которые бы обеспечили наилучшее согласие теоретической модели и реальных данных [1].

Постановка эксперимента

Экспериментальные результаты для данной работы были получены в ходе испытания спаркера АО «НИИ «Атолл» на Ивановском водохранилище (г. Дубна). Схема эксперимента показана на рис. 1.

Электроискровой источник (спаркер) возбуждал широкополосные сигналы в пределах 200–5000 Гц. Акустическое поле регистрировалось 24 приемными гидрофонами донной косы № 1, оцифровка и запись на персональный компьютер производилась при помощи устройства ввода-вывода данных.

Исходя из соотношения сигнал/шум, наилучшее качество принимаемых сигналов наблюдалось на гидрофоне № 7 (см. рис. 1), поэтому в качестве экспериментальных результатов приводятся временные выборки и амплитудные спектры с данного гидрофона.

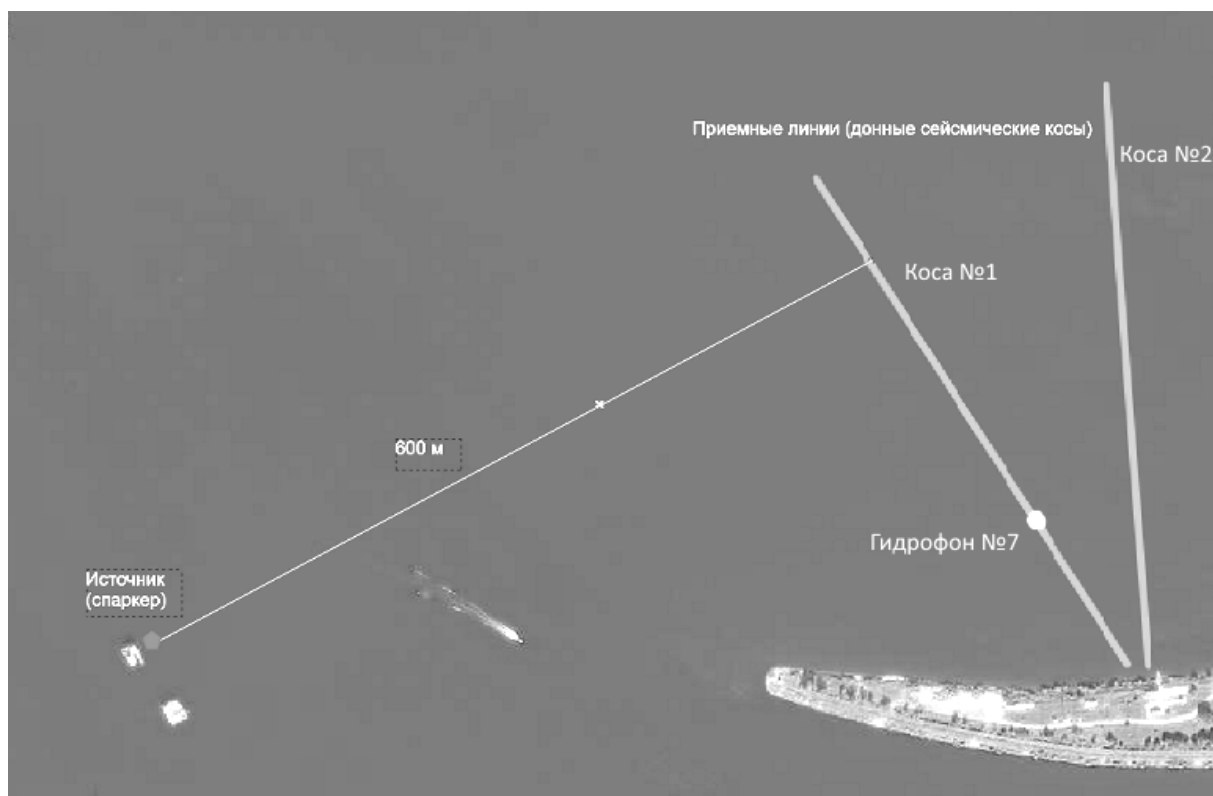


Рис. 1. Схема эксперимента

Теоретическая модель

Теоретическая модель представляет передаточную функцию среды – спектр сигнала. В расчете передаточной характеристики звуковое поле представляется в виде суммы нормальных волн [1]:

$$p(z, r) = \sum_n^N \frac{\psi_n(z) \psi_n(z_s)}{\sqrt{\xi_n} r} e^{i \xi_n r}, \quad (1)$$

где N – число учитываемых мод; z и z_s – глубины приемника и источника звука; r – расстояние до приемника; ξ_n – собственные значения; ψ_n – собственные функции задачи Штурма – Лиувилля:

$$\frac{d^2 \psi_n(z)}{dz^2} + \left\{ \left[\frac{\omega}{c(z)} \right]^2 - \xi_n^2 \right\} \psi_n(z) = 0. \quad (2)$$

С граничными условиями: $\psi_n(0) = 0$, $\psi_n(H) + g_n \frac{d\psi_n(H)}{dz} = 0$, g_n – комплексный импеданс дна:

$$g_n = \frac{m}{\sqrt{\xi_n^2 - k_1^2}}, \quad (3)$$

где $m = \frac{\rho_1}{\rho}$, $k_1 = \frac{\omega}{c_1(H)} n_1 (1 + i\alpha)$, n_1 – показатель преломления дна; $n_1 = \frac{c(H)}{c_1}$, ρ , c и ρ_1 , c_1 – плотность, скорость звука в воде и грунте соответственно.

Число мод N вычисляется по формуле:

$$N = \left\lceil \frac{1}{2} + \frac{H\omega}{\pi} \sqrt{\frac{1}{c^2(H)} - \frac{1}{c_1^2}} \right\rceil. \quad (4)$$

$N = 2$ для условий эксперимента: $H = 10$ м, $\omega = 200$ Гц, $c(H) = 1481$ м/с и параметре модели донного грунта $c_1 = 1550$ м/с.

Обработка экспериментальных результатов

Для расчета экспериментального спектра был взят сигнал с гидрофона № 7 (рис. 2).

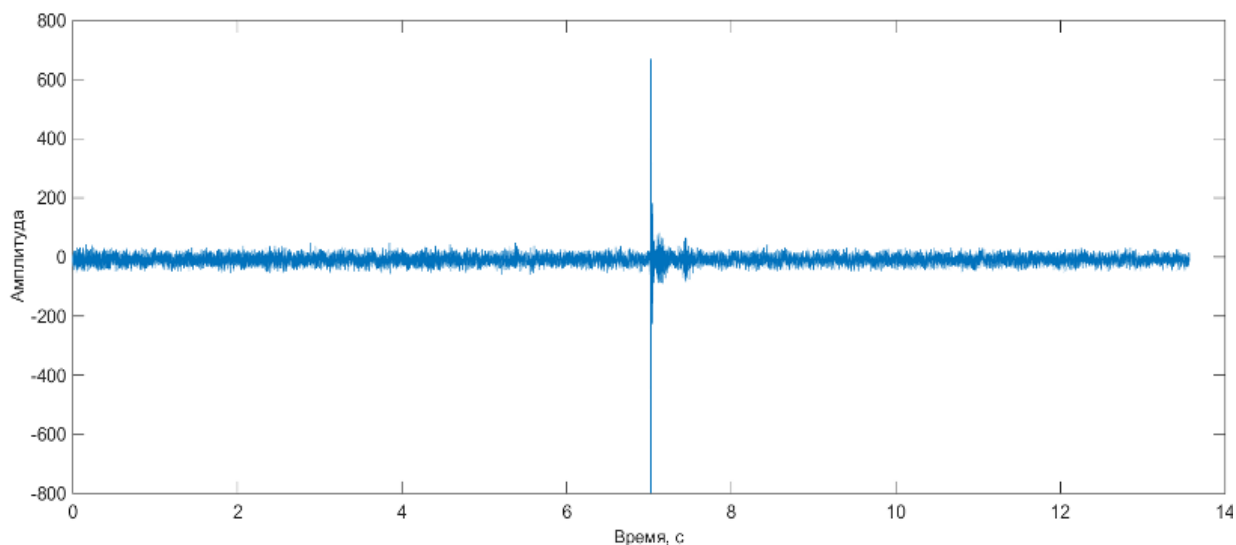


Рис. 2. Сигнал с гидрофона № 7 до обработки

Предварительно к сигналу были применены процедуры обработки: полосовая фильтрация для подавления низкочастотных помех,

а также вейвлет-фильтрация для подавления случайных помех и шумов моря. Результат обработки приведен на рис. 3.

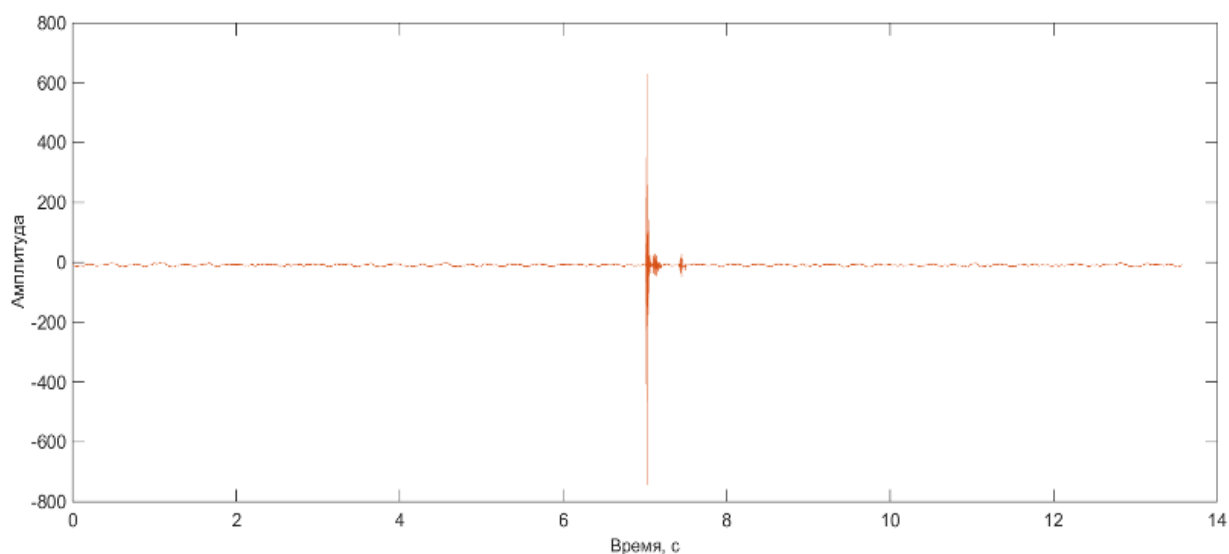


Рис. 3. Сигнал с гидрофона № 7 после обработки

По записям с контрольного гидрофона (рис. 4) видно, что основная энергия сигнала сосредоточена в полосе частот 200–5000 Гц, а максимум наблюдается на 1000–1200 Гц. Из этого можно сделать вывод о целесообраз-

ности обработки в диапазоне частот, где наблюдается пиковое значение энергии сигнала. К сожалению, частота дискретизации блока регистрации донной линии (2000 Гц) ограничивает полосу частот до 1000 Гц (рис. 5).

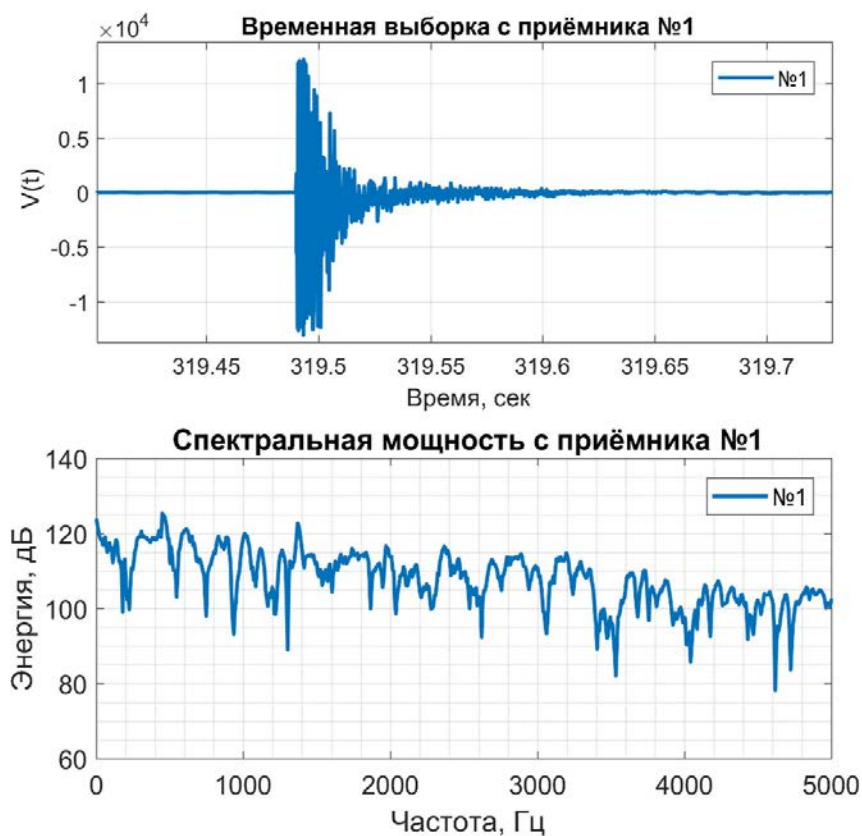


Рис. 4. Временная выборка и спектр сигнала с контрольного гидрофона

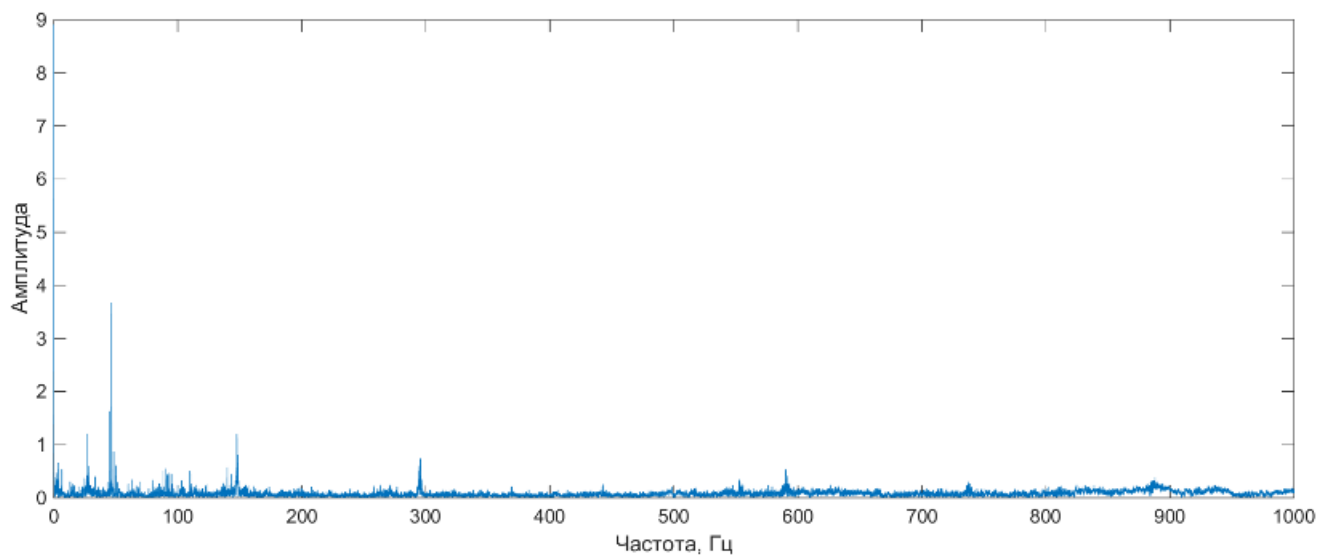


Рис. 5. Спектр сигнала с гидрофона № 7

К экспериментальному спектру был применен полосовой фильтр и сглаживающее окно. Результат представлен на рис. 6.

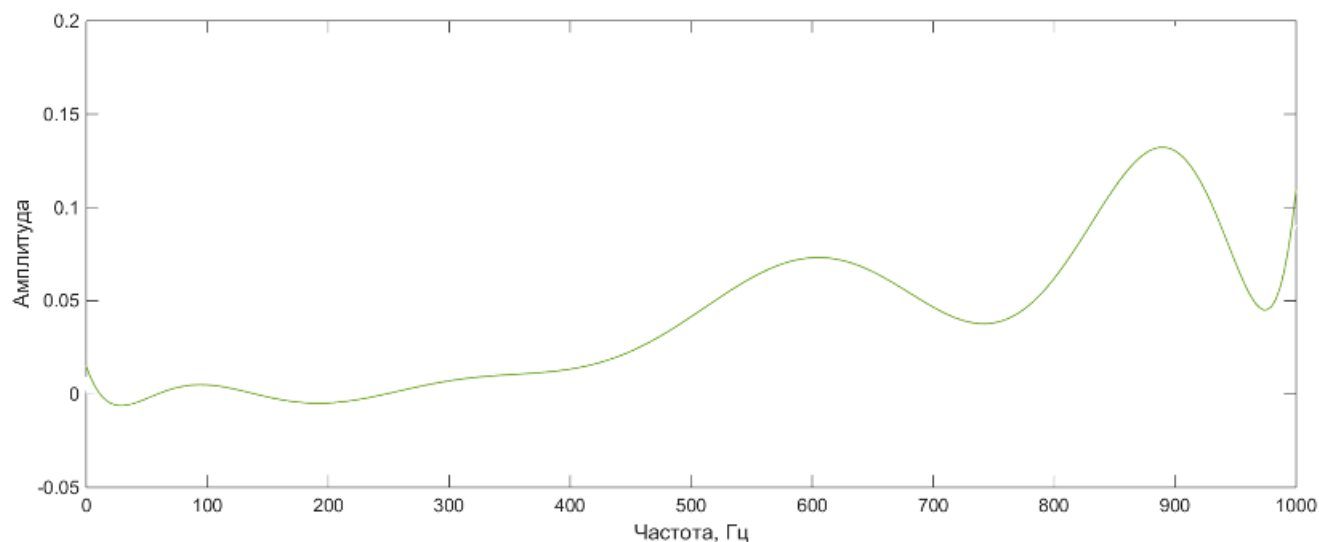


Рис. 6. Спектр после обработки

Анализ полученных результатов

Далее по формулам (1) – (4) вычисляется теоретическая модель $p(z, r)$, затем по алго-

ритму БПФ – его спектр. Результат совмещения теоретического и экспериментального спектров приведен на рис. 7.

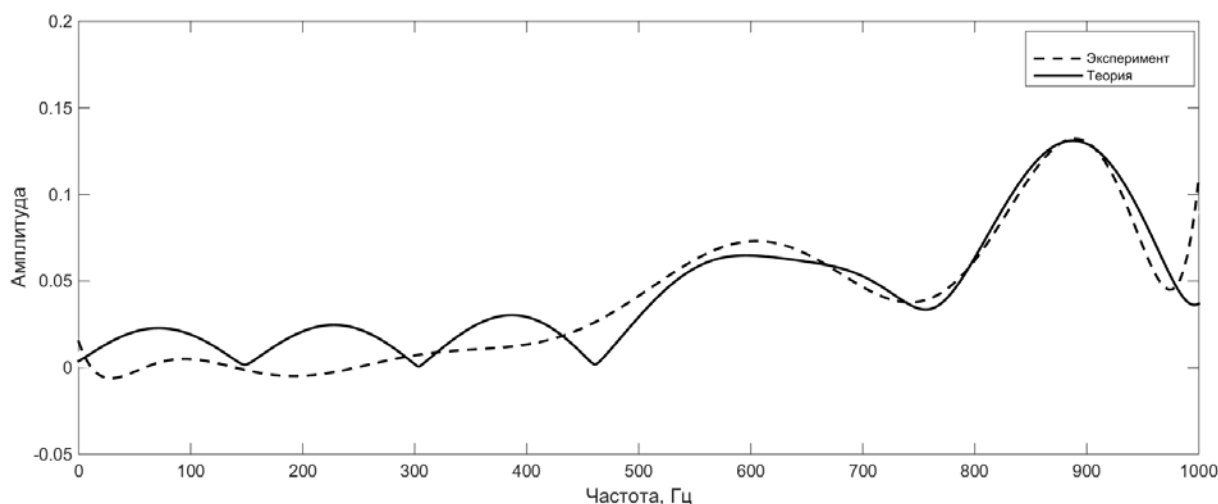


Рис. 7. Экспериментальный (пунктир) и теоретический (сплошная линия) спектр сигналов

На рис. 7 видно, что амплитуды теоретического и экспериментального спектров отличаются, однако основные минимумы и максимумы совпадают. Такое расхождение экспериментального и теоретического спектров по амплитудам может объясняться случайной неоднородностью среды. Положения минимумов и максимумов в спектре зависят от значений c и ρ , по которым косвенно можно оценить литологию донных отложений. Таким образом, подбирая параметры модели, а имен-

но скорость звука в осадках и плотность, которые используются в уравнении (2), и сравнивая ее с реальными спектрами сигналов, можно оценить литологию донных осадков. Наилучшее совпадение теоретической модели с данными эксперимента было достигнуто при $\rho = 1.8 \text{ г/см}^3$, $c = 1541 \text{ м/с}$. Такие параметры соответствуют слабо консолидированным осадкам – илам и пескам, что соответствует данным пробоотбора в нескольких точках изучаемой территории.

Библиографический список

1. Акустика дна океана / Е.М. Ховем, Г.Х. Циим, М.Х. Мангнани [и др.] ; под ред. У. Купермана, Ф. Енсена ; пер. с англ. Э.В. Житковский, А.Ю. Захлестина. – М. : Мир, 1984. – 454 с.

2. Григорьев, В. А. Определение поглощающих и рассеивающих свойств дна в мелком море по спектрам широкополосных сигналов / В.А. Григорьев, Б.Г. Кацнельсон // Акустический журнал. – 2001. – Т. 47, № 3. – С. 330–335.

3. Григорьев, В. А. Определение эффективных параметров дна мелкого моря по спектрам широкополосных акустических сигналов в условиях гидродинамической изменчивости / В.А. Григорьев, Б.Г. Кацнельсон, J.F. Lynch // Акустический журнал. – 2016. – № 3. – С. 330–340.

4. Клей, К. Акустическая океанография. Основы и применения / К. Клей, Г. Медвин. – М. : Мир, 1980. – 584 с.

5. Таранов, Э. С. Гидроакустические измерения в океанологии / Э.С. Таранов, А.М. Тюрин, А.П. Сташкевич. – Л. : ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ, 1972. – 324 с.

*Поступила в редакцию
06.12.2018*