

Влияние статистики распределения донных дискретных неоднородностей по размерам на обратное рассеяние акустических волн

И. Ю. Грязнова,^{*} Е. Н. Иващенко,[†] М. С. Лабутина[‡]
Нижегородский государственный университет имени Н.И.Лобачевского
Нижний Новгород, 603950, пр. Гагарина, д. 23
 (Статья поступила 26.06.2017; Подписана в печать 11.09.2017)

Исследовано влияние статистики распределения дискретных неоднородностей по размерам на среднюю интенсивность обратно рассеянных акустических сигналов. Показано, что появление рассеивателей разных размеров на «звукотранспарантном» дне приводит к увеличению средней интенсивности обратного рассеяния по сравнению с рассеянием на неоднородностях одинакового размера. Доказано, что при наличии отражающей подложки вклад интерференционного слагаемого в среднюю интенсивность при обратном рассеянии на неоднородностях разных размеров уменьшается с увеличением среднего размера рассеивателей.

PACS: 43.20.Fn, 43.30.Gv. УДК: 534.2

Ключевые слова: гидроакустические сигналы, рассеяние, отражение, донные неоднородности, распределение по размерам.

ВВЕДЕНИЕ

Явление рассеяния присуще волнам любой природы, будь то электромагнитное излучение, волны, описывающие движение ядерных частиц, сейсмические волны или гидролокационные сигналы. Необходимость исследования эффектов обратного рассеяния на дискретных неоднородностях вызвана широким спектром задач в различных областях физики. К ним относятся рассеяние акустических сигналов на газовых пузырьках и дискретных донных неоднородностях океана, таких как железомарганцевые конкреции, рассеяние радиоволн на атмосферных осадках, рассеяние электромагнитных волн на электронах в плазме, рассеяние нейтронов на полидисперсных системах рассеивателей [1–3].

Развитие теории распространения волн в случайно-неоднородных средах относится в основном ко второй половине XX века. Этому вопросу уделялось внимание в работе Бреховских и Лысанова [4], посвящены фундаментальные труды Чернова [5], Рытова, Кравцова и Татарского [6].

Зондирование на основе рассеяния звука является дистанционным методом диагностики и в ряде случаев является наиболее предпочтительным в практике океанических исследований. Большой интерес представляет изучение местоположения и поведения источников обратного рассеяния, обусловленных планктоном и живыми организмами [7]. Не менее важна задача регистрации дистанционным методом газовых пузырьков или пелены пузырьков, появление которых может быть вызвано техногенными процессами и катастрофами. Например, утечка газа из-за аварии на газопро-

водах, участки которых проложены по дну водоемов. Особую актуальность имеет дистанционное акустическое зондирование морского дна, это вызвано решением практических задач инженерной сейсморазведки, поиска объектов в осадочных слоях и экологического контроля в районах расположения портов, морских трубопроводов и морских добывающих платформ [8], а также задач обнаружения месторождений железомарганцевых конкреций на дне океана.

1. МОДЕЛИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ПО РАЗМЕРАМ

В данной работе исследуется обратное рассеяние акустических волн на дискретных случайных неоднородностях, расположенных на плоском, слабо отражающем дне.

В качестве моделей распределения неоднородностей по размерам будем использовать распределение Гаусса и распределение Рэлея. Распределение Гаусса или нормальное распределение задается функцией плотности вероятности.

$$W(a) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(a-a_0)^2}{2\sigma^2}\right\}, \quad (1)$$

где a_0 — среднее значение, σ^2 — дисперсия

Вторым рассматриваемым распределением является распределение Рэлея.

$$W(a) = \frac{a}{2\sigma^2} \exp\left\{-\frac{a^2}{2\sigma^2}\right\}, \quad (2)$$

где σ — параметр, связанный со средним значением следующим образом:

$$a_0 = \sqrt{\frac{\pi}{2}}. \quad (3)$$

*E-mail: gryaznova@rf.unn.ru

†E-mail: en.ivashchenko@gmail.com

‡E-mail: labutya@mail.ru

По данным работы [1] именно рэлеевское распределение по размерам наблюдается в случае обнаружения железомарганцевых конкреций (ЖМК).

2. СРЕДНЯЯ ИНТЕНСИВНОСТЬ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ В ПРИСУТСТВИИ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ РАЗНЫХ РАЗМЕРОВ

Для оценки изменений, к которым приводит наличие рассеивателей разных размеров, сначала предположим, что подстилающее неоднородности дно звукопрозрачно, а среднее число рассеивающих сфер на единичной площадке (средняя концентрация) неизменно. Положим, что произведение волнового числа k на радиус рассеивающих частиц $ka \sim 1$, в этом случае модуль коэффициента обратного рассеяния на уединенной сфере можно считать равным

$$|\alpha(ka)| = \frac{a}{2}. \quad (4)$$

Тогда в случае распределения Рэля (2) средняя интенсивность обратного рассеяния равна

$$\begin{aligned} \langle I \rangle_{Rayleigh} &= \left(\frac{p_0 \lambda}{4h} \right)^2 \left\{ \frac{\pi \langle n \rangle}{d^2} + \langle n \rangle^2 \right\} \int_0^\infty \frac{a^3}{2\sigma^2} e^{-\frac{a^2}{2\sigma^2}} da = \\ &= \left(\frac{p_0 \lambda}{4h} \right)^2 \left\{ \frac{\pi \langle n \rangle}{d^2} + \langle n \rangle^2 \right\} 2\sigma^2. \end{aligned} \quad (5)$$

Для нормального распределения рассеивателей по размерам (1) выражение для средней интенсивности будет выглядеть следующим образом:

$$\langle I \rangle_{Gauss} = \left(\frac{A_0 \lambda}{4h} \right)^2 \left\{ \frac{\pi \langle n \rangle}{d^2} + \langle n \rangle^2 \right\} \int_0^\infty \frac{a^2}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(a-a_0)^2}{2\sigma^2}} da. \quad (6)$$

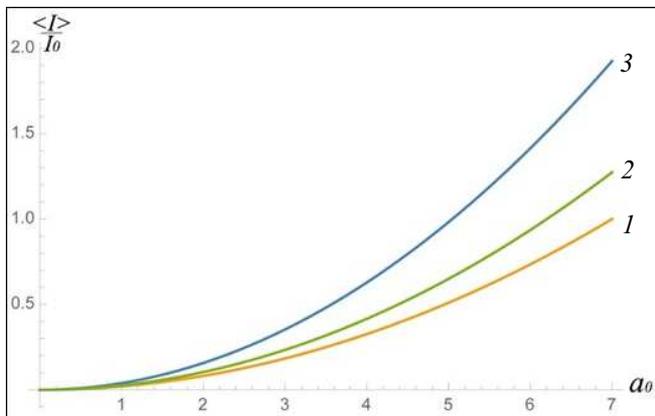


Рис. 1: Средняя интенсивность обратного рассеяния при 1 — одинаковых размерах рассеивателей, 2 — распределении Рэля, 3 — распределении Гаусса

Наличие рассеивателей разных размеров приводит к увеличению средней интенсивности поля, отраженного от дискретных неоднородностей (рис. 1). Физически это может быть объяснено тем, что присутствие более крупных неоднородностей приводит к почти зеркальному отражению от них падающей нормально волны, в то время как более мелкие неоднородности имеют широкую диаграмму рассеяния.

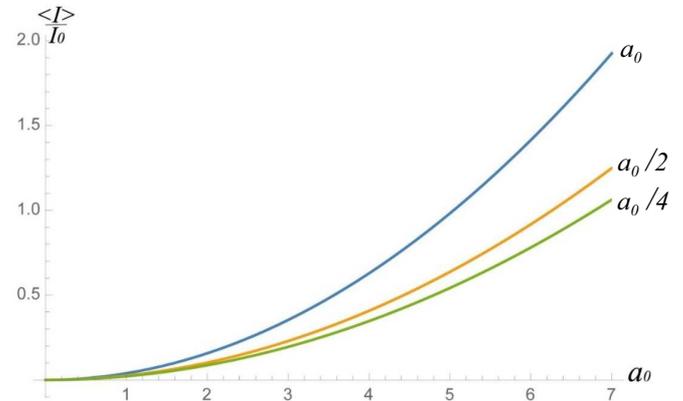


Рис. 2: Средняя интенсивность обратного рассеяния при нормальном распределении неоднородностей по размерам при различных значениях СКО

Анализ зависимости интенсивности обратного рассеяния при нормальном распределении неоднородностей по размерам (рис. 2) позволяет говорить и о росте средней интенсивности при увеличении среднеквадратичного отклонения (СКО). Качественно этот эффект может быть связан с появлением в таких распределениях крупных неоднородностей, поскольку при увеличении СКО их количество возрастает.

3. ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЕ СЛАГАЕМОЕ СРЕДНЕЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ПРИ НАЛИЧИИ РАССЕИВАТЕЛЕЙ РАЗНЫХ РАЗМЕРОВ

Перейдем к рассмотрению эффектов, к которым приводит наличие некоторого разброса неоднородностей по размерам при учёте влияния подстилающей подложки [9, 10]. При распределениях неоднородностей по размерам в выражении для средней интенсивности возникает дополнительное слагаемое, описывающее интерференцию когерентных компонент сигналов, отраженного от «чистого» дна и рассеянного неоднородностями.

Вклад интерференционного слагаемого при наличии рассеивателей разных размеров определяется как средним радиусом неоднородностей, так и СКО (рис. 3, 4).

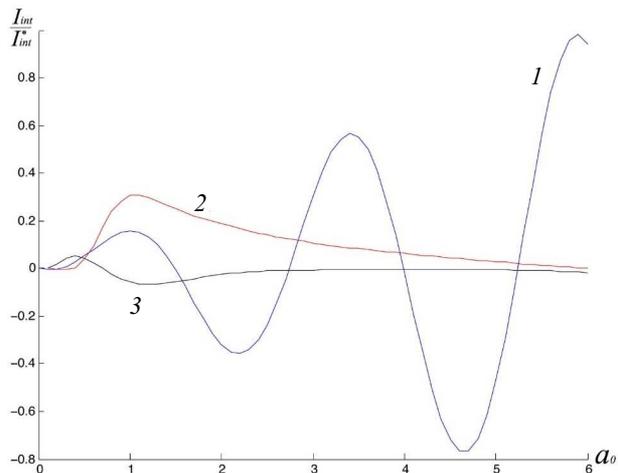


Рис. 3: Зависимость интерференционного слагаемого средней интенсивности поля обратного рассеяния от среднего размера рассеивателей: 1 — при одинаковых размерах (амплитуда уменьшена в 6 раз), 2 — при распределении Рэлея ($\sigma = a_0$), 3 — при распределении Гаусса ($\sigma = a_0$)

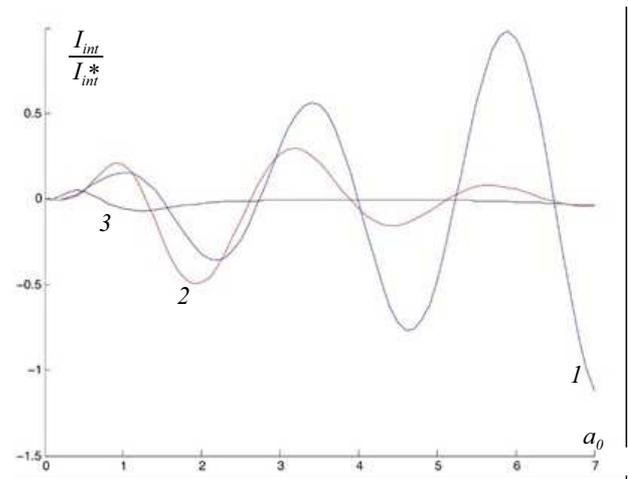


Рис. 4: Зависимость интерференционного слагаемого средней интенсивности поля обратного рассеяния от среднего размера рассеивателей: 1 — при одинаковых размерах (амплитуда уменьшена в 6 раз), 2 — при распределении Гаусса с $\sigma = 0,5a_0$, 3 — при распределении Гаусса с $\sigma = a_0$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе продемонстрировано значительное уменьшение интерференционного слагаемого средней интенсивности обратного рассеяния в присутствии рассеивателей разных размеров. Качественно этот эффект может быть объяснен тем, что наличие неоднородностей разных размеров, располагающихся на одной плоскости, приводит к «размыванию» фазовых соотношений рассеянных сигналов, в результате не происходит эф-

фективного сложения с отраженным от подложки сигналом. Таким образом, при существовании некоторого распределения по размерам рассеивающих дискретных донных неоднородностей, средняя интенсивность обратного рассеяния увеличивается, при этом влиянием интерференционных эффектов можно пренебречь, что существенно упрощает решение обратной задачи.

Работа выполнена в рамках базовой части государственного задания по проекту № 3.5672.2017/8.9.

- [1] Бунчук А. В., Ивакин А. Н. Акуст. журн. 1989. **35**, № 1. С. 8.
 [2] Джепаров Ф. С., Львов Д. В., Забелин К. С. Труды научной сессии МИФИ. 2008. **3**. С. 183.
 [3] Алексеев В. Н., Рыбак С. А. Акуст. журн. 1997. **43**, № 6. С. 730.
 [4] Бреховских Л. М., Лысанов Ю. П. Теоретические основы акустики океана / Л: Гидрометеиздат, 1982.
 [5] Чернов Л. А. Волны в случайно-неоднородных средах / М.: Наука, 1977.
 [6] Рытов С. М., Кравцов Ю. А., Татарский В. И. Введение в статистическую радиофизику, часть II. М.: Наука,

1978.
 [7] Буланов В. А., Стороженко А. В. Техническая акустика. 2011. № 11.
 [8] Крылов В. В. Основы теории излучения и рассеяния звука. / М.: Изд-во Московского университета, 1989.
 [9] Грязнова И. Ю., Иващенко Е. Н. Вестник Нижегородского государственного ун-та имени Н. И. Лобачевского. 2014. №1(1). С.70.
 [10] Гурбатов С. Н., Грязнова И. Ю., Иващенко Е. Н. Акуст. журн. 2016. **62**, № 2. С. 203.

Influence of the sizes statistics distribution of bottom discrete inhomogeneous on backscattering of acoustic waves

I. Yu. Gryaznova^a, E. N. Ivaschenko^b, M. S. Labutina^c

N.I. Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod. Nizhny Novgorod, 603950, Russia
E-mail: ^agryaznova@rf.unn.ru, ^ben.ivashchenko@gmail.com, ^clabutya@mail.ru

The influence of the distribution of discrete inhomogeneities in size on the average intensity of backscattered acoustic signals is investigated. It is shown that the appearance of scatterers of different sizes on the «translucent» bottom leads to an increase in the average backscattering intensity in comparison with scattering by inhomogeneities of the same size. It is proved, that in the case of a reflecting bottom the contribution of the interference term to the average intensity of backscattering on inhomogeneities of different sizes decreases with increasing mean size of the scatterers.

PACS: 43.20.Fn, 43.30.Gv

Keywords: hydroacoustic signals, scattering, reflection, bottom inhomogeneities, size distribution.

Received 26 June 2017.

Сведения об авторах

1. Грязнова Ирина Юрьевна — канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент кафедры акустики; e-mail: gryaznova@rf.unn.ru.
 2. Иващенко Елена Николаевна — аспирант кафедры акустики; e-mail: en.ivashchenko@gmail.com.
 3. Лабутина Мария Сергеевна — аспирант кафедры акустики; e-mail: labutya@mail.ru.
-