

## Физическое моделирование распространения звука в шельфовой зоне Мирового океана

А. Е. Бычков<sup>1,\*</sup>, И. Ю. Грязнова<sup>1,†</sup>, М. С. Дерябин<sup>1,2,‡</sup>, В. В. Курин<sup>1,§</sup>, А. И. Хилько<sup>1,2,¶</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского» (ННГУ)  
Россия, Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23

<sup>2</sup>Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН)  
Россия, Нижний Новгород, ул. Ульянова, д. 46

(Статья поступила 14.11.2019; подписана в печать 15.01.2020)

Целью работы являлось исследование вертикальной структуры коротких модовых импульсов вблизи критических толщин волноводов постоянной и переменной глубины с различными моделями дна. В ходе работы было теоретически получено выражение критерия разрешимости для коротких модовых импульсов в волноводах постоянной глубины с различными типами дна. Получена формула оптимального расстояния разрешения последовательных модовых импульсов, приходящих в точку приема сигнала, в зависимости от параметров излучаемого сигнала и параметров самого волновода. На основе теоретически полученных результатов разработана математическая модель распространения коротких модовых импульсов в волноводах постоянной и переменной глубины. Получена теоретическая модель для расчета огибающей акустического радиоимпульса в волноводе переменной глубины с различными типами дна. Данная модель численно описывает распространение сигнала, в ходе которого происходит разделение излучаемого короткого сигнала на импульсы по отдельным модам, связанное с межмодовой дисперсией, и уширение импульса на каждой моде из-за влияния внутримодовой частотной дисперсии. В ходе экспериментальной части работы проведено измерение амплитуды сигнала от времени на трассах различной длины при фиксированном заглублении приемника, также определялась длительность излученного сигнала на приемнике. Проведено измерение амплитуды принимаемых последовательных модовых импульсов при различных заглублениях приемника.

PACS: 43.20.Fn, 43.30.Vg.

УДК: 534.2

Ключевые слова: масштабное физическое моделирование, межмодовая дисперсия, внутримодовая дисперсия, модовый импульс, разрешение сигнала.

### ВВЕДЕНИЕ

Океанский шельф представляет собой зону вокруг континента, простирающуюся от линии низкой воды до глубины, на которой происходит резкое увеличение уклона дна в сторону больших глубин. С точки зрения акустики, океанский шельф — это волновод, ограниченный поверхностью воды и дном. На распространение звука в таких волноводах оказывают влияние множество факторов. Наиболее существенные из них — форма профиля скорости звука и геоакустические свойства морского дна. Нужно заметить, что указанные факторы испытывают большие вариации в зависимости от географического положения, времени года и погодных условий.

Несмотря на полученные результаты различных групп исследователей, освоение ресурсов северного шельфа и мелководных окраинных морей требует получения еще большего информационного гидроакустического обеспечения.

### 1. НАХОЖДЕНИЕ КРИТЕРИЯ РАЗРЕШИМОСТИ ДВУХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ МОД В ВОЛНОВОДЕ

Излагаемый ниже способ селекции мод основан на межмодовой дисперсии, проявляющейся в различии групповых скоростей отдельных мод [1]. Для его осуществления проводится импульсное возбуждение волновода. Точечный излучатель, расположенный в волноводе, создает радиоимпульсы длительностью  $\tau_0$  с частотой заполнения  $f_0$  и шириной спектра  $2\Delta f$ . Так как в среде имеет место геометрическая дисперсия, то групповая скорость зависит не только от номера моды, но и частоты. Поэтому в процессе распространения импульса происходит его разделение на импульсы по отдельным модам, связанное с межмодовой дисперсией, и уширение импульса на каждой моде из-за влияния внутримодовой частотной дисперсии. Отдельные нормальные волны, разрешаются, если время прихода заднего фронта импульса, соответствующего моде  $n$ , меньше времени прихода переднего фронта импульса, представляющего моду  $n + 1$  номера. Разрешение импульсов для мод с номерами  $n$  и  $n + 1$  происходит на расстояниях:

$$R > \frac{\tau_0 v_n, f_0 - \Delta f v_{n+1}, f_0 + \Delta f}{v_n, f_0 - \Delta f - v_{n+1}, f_0 + \Delta f} \quad (1)$$

Кроме того необходимо, чтобы дисперсия групповых скоростей для заданного номера  $n$  из-за конечности

\*E-mail: bychkov-a@bk.ru

†E-mail: gryaznova@rf.unn.ru

‡E-mail: mmm1984@inbox.ru

§E-mail: kurin@rf.unn.ru

¶E-mail: A.khil@hydro.appl.sci.nnov.ru

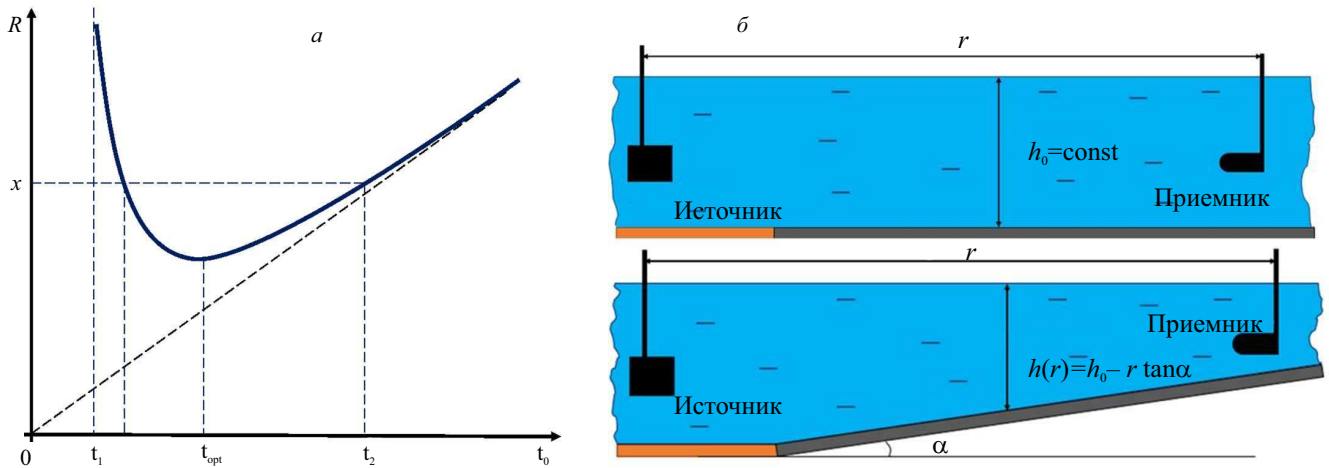


Рис. 1: а — Качественная зависимость расстояния разделения мод  $R$  от начальной длительности импульса  $\tau_0$ . б — Схема проведения экспериментов в волноводах постоянной (верху) и переменной (внизу) глубины

ширины спектра излучаемого сигнала  $2\Delta f$  была меньше дисперсии групповых скоростей для мод соседних номеров, т.е. выполнялось следующее условие [2, 3]:

$$(v_{n, f_0 + \Delta} - v_{n, f_0 - \Delta}) < (v_{n, f_0 - \Delta} - v_{n+1, f_0 + \Delta}) \quad (2)$$

На рис. 1, а показана качественная зависимость расстояния разделения мод  $R$  от начальной длительности импульса  $\tau_0$  для некоторой несущей частоты  $f$ . Также была получена функция зависимости расстояния разделения мод  $r$  от длительности импульса  $T$ :

$$r = \frac{cT}{\frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{(n+1)\pi c}{H(\omega + \Delta\omega)}\right)^2}} - \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{n\pi c}{H(\omega - \Delta\omega)}\right)^2}}}, \quad (3)$$

где  $c$  — скорость звука,  $H$  — глубина волновода,  $\omega$  — частота заполнения,  $\Delta\omega$  — полуширина спектра. Формула (3) позволяет вычислить оптимальное расстояние разделения двух последовательных мод с номерами  $n$  и  $n + 1$ .

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Физическое моделирование проводилось на акустическом комплексе кафедры акустики Нижегородского университета. Эксперименты проводились в лабораторной ванне с заглушенными стенками длиной 500 см, шириной 65 см, и глубиной 55 см, заполненной водой ( $c$ ,  $\rho$  — скорость звука и плотность воды), в которой устанавливалось подвесное дно ( $c_1$ ,  $\rho_1$  — скорость звука и плотность подложки). Дно с помощью винтов можно перемещать в вертикальной плоскости от 0 до 17 см. Фиксируя угол наклона дна установки, можно моделировать как плоский волновод, так и волновод

с переменной по трассе глубиной, при этом угол наклона дна будет постоянный по всей длине трассы. На рис. 1, б изображено взаимное расположение излучателя и приемника при проведении экспериментов.

Для создания коротких импульсных сигналов прямоугольной формы с высокочастотным заполнением  $f_0$ , используется генератор сигналов Tektronix AFG 3102. Для уменьшения уровня помех, связанных с реверберацией, которые возникают из-за ограниченности исследуемого объема, в эксперименте используется импульсный режим излучения.

Длительность излучаемых прямоугольных импульсов  $\tau_0$  удовлетворяет условию  $f_0\tau_0 \gg 2\pi$ , таким образом, обеспечивается квазимонохроматический режим излучения. Сформированный генератором прямоугольный сигнал поступает на усилитель сигналов Amplifier research Model 75A250 75Watts, а затем на излучатель сигналов PANAMETRIX A430S.

Синхронизация работы всей установки обеспечивается синхронизирующим импульсом, вырабатываемым тем же генератором Tektronix AFG 3102.

Пройдя через исследуемую среду, сигнал принимается гидрофоном Brüel & Kjaer Type 8103. Приемник закреплен на каретке, способной перемещаться в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Принятый сигнал после усиления передается на цифровой осциллограф Tektronix DPO 4102B, где записывается на цифровой носитель для дальнейшей обработки на персональном компьютере.

На рис. 2 полученные в ходе лабораторного эксперимента результаты сравниваются с теоретическими зависимостями. Для примера на рис. 3 приведены структуры второго модового импульса в волноводах постоянной и переменной глубины.

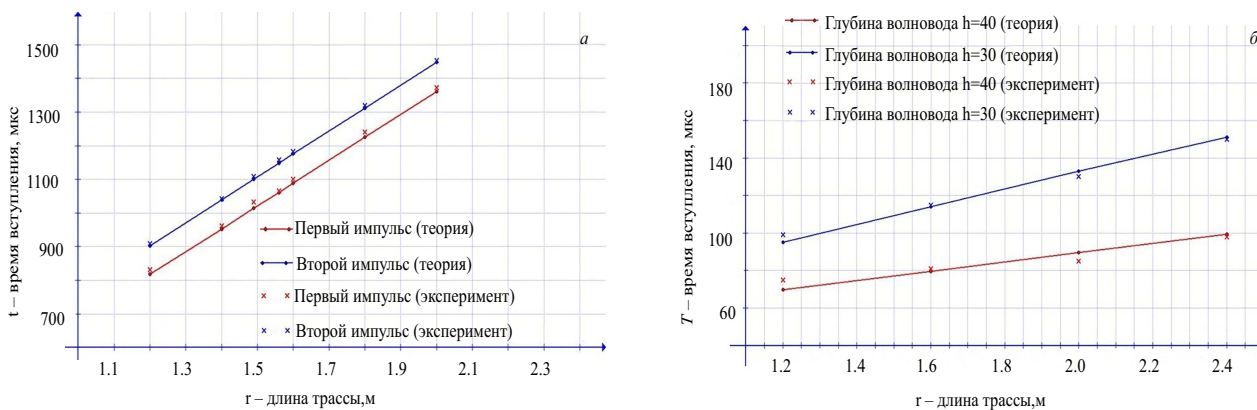


Рис. 2: (а) Теоретический и экспериментальный графики зависимостей времени вступления модовых импульсов от длины трассы между источником и приемником. (б) Зависимость длительности принимаемого гидрофоном сигнала от длины трассы источник-приемник

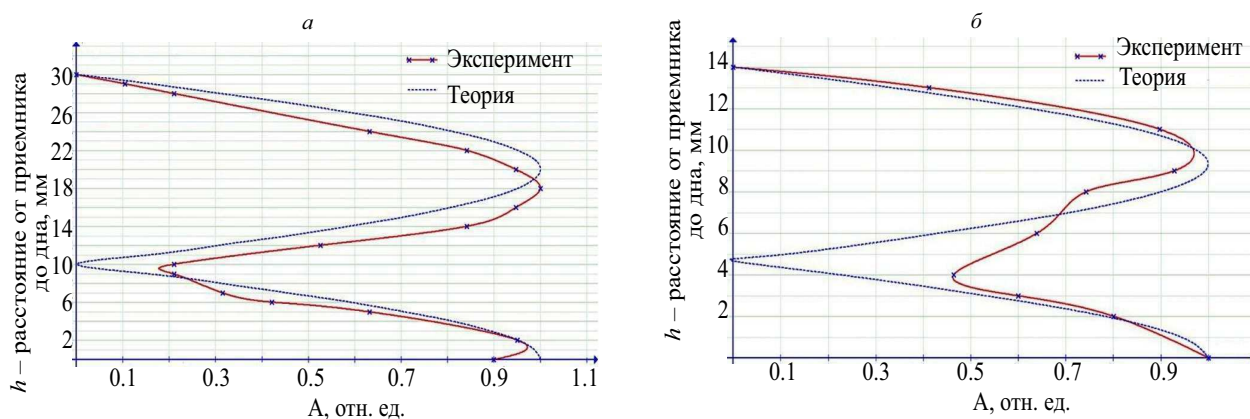


Рис. 3: (а) Вертикальная структура второго модового импульса в волноводе постоянной глубины. (б) Вертикальная структура второго модового импульса в волноводе переменной глубины

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Проведено сравнение данных, полученных в ходе проведенных на кафедре акустики ННГУ экспериментов по физическому масштабному моделированию распространения коротких модовых импульсов в волново-

дах постоянной и переменной глубины, получено хорошее соответствие выдвинутой теоретической модели экспериментальным результатам.

Работа выполнена в рамках базовой части госзадания №3.5672.2017/ 8.9.

[1] Гончаров В. В., Зайцев В. Ю., Куртепов В. М. и др. Акустическая томография океана. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 1997.  
 [2] Гурбатов С. Н., Егорычев С. А., Захаров Д. А., Курин В. В., Кустов Л. М., Прончатов-Рубцов Н. В. Методы

акустической диагностики неоднородных сред. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2002. С. 85.  
 [3] Кацнельсон Б. Г., Петников В. Г. Акустика мелкого моря. М.: Наука, 1997.

## Physical modeling of sound propagation in the shelf zone of the oceans

A. Y. Bychkov<sup>1,a</sup>, I. Yu. Gryaznova<sup>1,b</sup>, M. S. Deryabin<sup>2,c</sup>,  
V. V. Kurin<sup>1,d</sup>, A. I. Khilko<sup>2,e</sup>

<sup>1</sup>*Department of Acoustics, Faculty of Radiophysics, Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod  
Russia, Nizhny Novgorod*

<sup>2</sup>*Institute of Applied Physics RAS, Russia, Nizhny Novgorod*  
E-mail: <sup>a</sup>*bychkov-a@bk.ru*, <sup>b</sup>*gryaznova@rf.unn.ru*, <sup>c</sup>*mmm1984@inbox.ru*,  
<sup>d</sup>*kurin@rf.unn.ru*, <sup>e</sup>*A.khil@hydro.appl.sci-nnov.ru*

The aim of the work was to study the vertical structure of short mode pulses near the critical thicknesses of waveguides of constant and variable depth with different bottom models. In the course of the work, the expression of the solvability criterion for short mode pulses in waveguides of constant depth with different types of bottom was theoretically obtained. A formula for the optimal resolution distance of successive mode pulses arriving at the signal receiving point, depending on the parameters of the emitted signal and the parameters of the waveguide itself, is obtained. Based on the theoretically obtained results, a mathematical model for the propagation of short mode pulses in waveguides of constant and variable depth has been developed. The theoretical model for calculating the envelope of an acoustic radio pulse in a waveguide of variable depth with various types of bottom is obtained. This model numerically describes the signal propagation, during which the emitted short signal is divided into pulses by individual modes, associated with intermode dispersion, and the pulse broadening at each mode due to the influence of intramode frequency dispersion. In the course of the experimental part of the work, the signal amplitude was measured over time on paths of various lengths with a fixed receiver depth, and the duration of the emitted signal at the receiver was also determined. The amplitude of the received sequential mode pulses was measured at various depths of the receiver.

PACS: 43.20.Fn, 43.30.Bp

*Keywords:* modeling, intermode dispersion, intramode dispersion, mode pulse, signal resolution.

*Received 14 November 2019.*

### Сведения об авторах

1. Бычков Андрей Евгеньевич — магистр; e-mail: bychkov-a@bk.ru.
2. Грязнова Ирина Юрьевна — доцент; e-mail: gryaznova@rf.unn.ru.
3. Дерябин Михаил Сергеевич — доцент, зав сектором ИПФ РАН; e-mail: mmm1984@inbox.ru.
4. Курин Василий Викторович (corresponding author) — доцент; e-mail: kurin@rf.unn.ru.
5. Хилько Александр Иванович — профессор, зав. лабораторией ИПФ РАН; e-mail: A.khil@hydro.appl.sci-nnov.ru.