## Затухание звукового давления и ортогональных проекций вектора колебательного ускорения в мелком море

А.И. Белов,\* Г.Н. Кузнецов<sup>†</sup>

Научный центр волновых исследований Института общей физики имени А.М. Прохорова РАН Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, д. 38 (Статья поступила 26.07.2017; Подписана в печать 19.09.2017)

Исследования пространственного затухания низкочастотных векторно-скалярных звуковых полей в мелком море выполнены с использованием буксируемой пневмопушки и четырехкомпонентных векторно-скалярных приемников. Экспериментальные данные и вычисленные на основе акустической калибровки волновода законы спадания звукового давления и ортогональных векторных проекций колебательного ускорения показали, что вертикальная проекция вектора колебательного ускорения убывает заметно быстрее, чем поле звукового давления.

РАСS: 43.30.+m УДК: 534.34; 534.231.1 Ключевые слова: затухание звукового давления, горизонтальных и вертикальных проекций вектора колебательного ускорения.

#### введение

Пространственное затухание звука является одним из важных факторов для оценки эффективности подводного наблюдения, влияющим на организацию систем навигации и акустического мониторинга морской акватории по акустическим сигналам. Особенно это актуально для зон океанического шельфа, в которых величины коэффициента затухания звуковых сигналов в значительных пределах изменяются в зависимости от района проведения экспериментов [1, 2]. Ниже исследуется в зависимости от расстояния затухание звукового давления (ЗД) и горизонтальной и вертикальной проекций вектора колебательного ускорения (ВП и ГП ВКУ). Эксперименты проводились с использованием буксируемой пневмопушки в мелководной акватории с постоянной глубиной места  $h_w = 53$  м. Условия проведения экспериментов подробно изложены в [3, 4] и в настоящем сборнике [5].

## 1. ЧАСТОТНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ОСЛАБЛЕНИЯ ЗД, ОРТОГОНАЛЬНЫХ ПРОЕКЦИЙ ВКУ И ОТДЕЛЬНЫХ ВЫДЕЛЕННЫХ МОД

Для оценки коэффициентов пространственного затухания (КПЗ) скалярных и векторных звуковых полей разработана процедура ослабления вклада помех в принятый суммарный сигнал. Для этого из энергии суммы сигнала и помехи вычиталась энергия помехи, и получались оценки энергии сигнала. Зависимости энергии сигнала от расстояния аппроксимировались цилиндрическим законом спадания с добавочным экспоненциальным затуханием. Анализ показал, что добавочное затухание *b* практически идентично для ЗД и ГП ВКУ, а для ВП ВКУ заметно выше. Зависимости величины b от частоты для двух глубин приема представлены на рис. 1. Видно, что в случае придонного приема КПЗ ВП ВКУ (глубина установки 52 м) превышают КПЗ ЗД практически во всем частотном диапазоне. Для приподнятого модуля (глубина установки 30 м) этот эффект наблюдается на частотах 100–150 Гц и выше.

Для исследования законов ослабления нормальных волн с целью селекции мод, формирующих принятые сигналы, выполнена узкополосная фильтрация сигналов. На рис. 2 приведены результаты такой фильтрации для приподнятого модуля. Расстояние до точки приема от точки излучения, измеренное по данным двух GPS, установленных на излучающем и приемном судах, составляло примерно 7575 м.

Установлено, что на частотах выше 30 Гц для приема в середине эквивалентного волновода временная структура сигналов, зарегистрированных приемниками ЗД и ГП ВКУ, идентична, а ЗД и ВП ВКУ — различается. Если поле ЗД формируют, в основном, первая и третья моды, то в поле ВП ВКУ главную роль играет вторая мода. Это полностью соответствует результатам работ [3, 4] и связано с положением приподнятого модуля вблизи нуля второй моды ЗД, в то время как на этой же глубине вторая мода ВП ВКУ достигает максимального значения. На частоте 26 Гц в волноводе на больших расстояниях (более 3-5 км) в звуковом поле присутствует только одна — первая мода. Остальные моды на этом расстоянии уже, практически, затухли. Поэтому КПЗ акустического поля на этой частоте одинаковы не только для двух разнесенных по вертикали приемных модулей, но и для ЗД, ГП ВКУ и ВП ВКУ.

При повышении частоты (на рис. 2 — до частоты 180 Гц) сигнал, зарегистрированный ВП ВКУ, заметно удлиняется по сравнению с сигналом, принятым приемником ЗД. Причина — на этой частоте при формировании поля ВП ВКУ более заметную роль играют моды высоких номеров, вклад которых в поле ЗД несущественен. Поэтому на высоких частотах КПЗ ВП ВКУ заметно больше КПЗ ЗД, поскольку при многомодовом

<sup>\*</sup>E-mail: belov-ai@mail.ru

<sup>&</sup>lt;sup>†</sup>E-mail: skbmortex@mail.ru



Рис. 1: Частотные зависимости коэффициентов пространственного затухания: *а* — модуль, приподнятый на 20 м над дном; *б* — придонный модуль; *1* — давление, *2* — вертикальная проекция колебательного ускорения



Рис. 2: Результаты узкополосной фильтрации принятого сигнала: *а-в, ж-и* – давление, *е-е, к-м* – вертикальная компонента колебательного ускорения, *а, г* – *f* = 26; *б, д* – 52; *в, е* – 78; *ж, к* – 104; *з, л* – 130; *и, м* – 180 Гц



Рис. 3: Коэффициенты затухания первых трех мод: а — мода 1, б — мода 2, в — мода 3

распространении звука при формировании ВП ВКУ моды низких номеров, имеющие минимальные КПЗ, подавляются, а моды высоких номеров, наоборот, подчеркиваются.

Для оценки КПЗ первых трех мод в выбранных частотных полосах выделялись огибающие всех сигналов от приподнятого модуля. Зависимость энергии моды от расстояния корректировалась на цилиндрический закон расхождения, после чего методом наименьших квадратов оценивался КПЗ моды  $g_m$ . Частотные зависимости КПЗ для трех мод представлены на рис. 3. Полученные значения КПЗ мод *B* используются далее для оценки поглощающих свойств морского дна. При этом применялись результаты работы [4], в которой на основании тех же самых экспериментальных данных получена модель дна с жидким слоем толщиной  $h_L = 18.9$  м, лежащем на полупространстве, и выполнены оценки значений плотности и скорости звука в этом слое и полупространстве. В данной работе используются результаты, полученные на частотах выше 50 Гц, а морское дно рассматривается по упрощенной модели — как полупространство с одним «жидким» слоем грунта. Параметры верхнего жидкого слоя грунта — плотность  $\rho$  и скорость звука c равны 1467 кг/м<sup>3</sup> и 1634.4 м/с. Поскольку глубина проникновения звука в грунт небольшая, то можно ограничиться толщиной слоя 18–20 м. В рамках такой модели поглощающие свойства дна характеризуются параметром  $\alpha$ , который отвечает за мнимую часть волнового числа в дне, которое в свою очередь задается как  $\tilde{k} = k(1 + i\alpha), k = 2\pi f/c.$ 

Оценка затухания в дне выполнялась так же, как в работе [4] — путем минимизации функционала вида  $L = \sum_{f_g} \sum_{n_g} (g^e - g^c)^2 \sigma_g^{-2}$ , где  $\sigma_g$  — среднее квадратичное отклонение экспериментальных оценок КПЗ мод;  $f_g$ ,  $n_g$  — значения частот и количество мод на частотах, для которых были получены оценки КПЗ. Индексами e и c обозначены, соответственно, экспе-





Рис. 4: Частотные зависимости коэффициентов затухания первых трех мод: a - мода 1, b - мода 2, s - мода 3;  $1 - экспериментальные данные, <math>2 - расчетные при \alpha = 0.0072$ ,  $3 - расчетные при \alpha = 0.0086$  (соответственно, сплошные и пунктирные линии)

риментальные оценки и рассчитанные значения КПЗ мод. Минимизация функционала L выполнялась путем многомерной оптимизации методом Нелдера-Мида [6]. Для успешной оптимизации вследствие нелинейности алгоритма задавались начальные значения вычисляемых параметров как можно ближе к искомым. Для этого водный слой заменялся изоскоростным слоем со скоростью звука  $c_w = 1475$  м/с. Для такой модели волновода (волновод Пекериса) в [2] приведены исходные выражения, на основе которых можно получить формулы, связывающие в явном виде искомый параметр  $\alpha$  и КПЗ мод  $g_m$ 

$$\begin{aligned} \alpha &= 2g_m \xi_m \gamma N \left( \frac{\gamma^2 + d^2 \gamma_w^2}{\gamma_w^2 \gamma^2 d} \right), \\ N &= \frac{h_w}{2} + \frac{d}{2\gamma} \frac{k_w^2 - k^2}{\gamma^2 + d^2 \gamma_w^2}, \\ \gamma_w &= \sqrt{k_w^2 - \xi_m^2}, \quad \gamma = \sqrt{\xi_m^2 - k^2}, \\ d &= \frac{\rho}{\rho_w}, \quad k_w = \frac{2\pi f}{c_w}, \end{aligned}$$

где m — номер моды,  $\rho_w = 1000 \ {\rm кг/m^3}$ . Оценки продольных волновых чисел мод  $\xi_m$  выполнены для модели идеального волновода с абсолютно мягкими границами и «эффективной» толщиной водного слоя  $H = h_w + \Delta h$ . В соответствии с [7] величина  $\Delta_h$  определяется как  $\Delta h = d(k_w \sin \theta)^{-1}$ ,  $\theta = \arccos(c_w/c)$ . Для такой модели продольные волновые числа  $\xi_m$  рассчитываются по известной формуле  $\xi_m = \sqrt{k_w^2 - (\pi m/H)^2}$ . Оценка начального приближения  $\alpha$  выполнялась на основании экспериментально измеренной частотной зависимости КПЗ второй моды, так как она более точно соответствует теоретическим представлениям в широкой полосе частот. В табл. 1 приведены оценки  $\alpha$  для четырех частот.

При проведении минимизации функционала L для всех частот в качестве начального приближения принято среднее значение  $\alpha = 0.0086$ . Это основано

на данных, представленных в таблице, из которой следует слабая зависимость  $\alpha$  от частоты. Это косвенно подтверждает возможность описания поля на этих частотах моделью Пекериса–Бреховских, поскольку для этой модели  $\alpha$  для всех мод и частот задается постоянной величиной [1]. В результате численной оптимизации было вычислено значение  $\alpha = 0.0072$ .

На рис. 4 приведены результаты сравнения экспериментальных данных и рассчитанных КПЗ первых трех мод для двух величин  $\alpha$ , равных рассчитанной величине 0.0072 и взятой непосредственно из эксперимента — 0.0086. Видно, что при некотором различии двух величин  $\alpha$  их использование достаточно точно аппроксимирует экспериментальные данные.

## 2. ОЦЕНКА ЗАТУХАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕЗУЛЬТАТОВ КАЛИБРОВКИ ВОЛНОВОДА

Ниже используется модель грунта в виде системы жидких слоев, лежащих на жестком или жидком полупространстве. Для выполнения прогнозных расчетов КПЗ нужны результаты экспериментальной оценки характеристик этих слоев и полупространства. В [4] для исследуемого района выполнена акустическая калибровка волновода, и на основании экспериментов вычислены указанные характеристики.

Это позволило построить модель передаточной функции волновода и сравнить экспериментально измеренные и рассчитанные зависимости для ЗД и ортогональных ГП и ВП ВКУ. Поэтому на рис. 5 для приподнятого модуля на частотах выше 100 Гц сравниваются пространственные зависимости ЗД и ВП ВКУ, измеренные экспериментально и рассчитанные с использованием модели. Видно, что на всех частотах экспериментальные зависимости ЗД и ВП ВКУ хорошо согласуются с рассчитанными характеристиками, вычисленными с использованием построенной в результате



Рис. 5: *1,* 2 — Рассчитанные и *3,* 4 — измеренные зависимости ЗД и ВП ВКУ от расстояния: *1,* 3 — давление; 2, 4 — колебательное ускорение; частоты: *a* — 130, *б* — 183 и *в* — 315 Гц

акустической калибровки модели многослойного волновода [4]. Причем, ВП ВКУ, построенная с использованием, в том числе мод высоких номеров, затухает заметно быстрее, чем ЗД и ГП ВКУ.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Волновод, в котором формируются колебательные ускорения (или скорости), совместно с векторноскалярным приемником является пространственным фильтром, различным образом «взвешивающим» их горизонтальные и вертикальные проекции. Горизонтальные проекции векторного приемника подавляют моды высоких номеров, вертикальные проекции — моды первых номеров.

Коэффициент затухания ВП ВКУ на средних и высоких частотах в два раза и более превышает КПЗ скалярных сигналов и ГП ВКУ. Из-за более интенсивного затухания мод высоких номеров при увеличении расстояния на всех низких частотах (при малом числе мод — в пределе — при распространении одной моды) величины КПЗ сближаются.

Из-за различия пространственной фильтрации мод различных номеров на выходе приемников ЗД, ВП и ГП ВКУ во временной области формируются различающиеся волновые пакеты, что важно для активной локации. В частности, на выходе вертикальных каналов сигналы заметно «затягиваются» по сравнению с остальными каналами. КПЗ отдельных мод заметно (вдвое и более) возрастают при увеличении номера моды. Коэффициент пропорциональности  $\alpha$  перед мнимой частью волнового числа, характеризующий величину затухания звуковых сигналов в донных осадках, слабо зависит от частоты и может быть принят как постоянная величина, что согласуется с моделью Пекериса– Бреховских и косвенно подтверждает возможность ее использования, по крайней мере, на средних частотах.

- [1] Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах. М.: Изд-во АН СССР, 1957.
- [2] Кацнельсон Б. Г., Петников В. Г. Акустика мелкого моря. М.: Наука, 1997.
- [3] Белов А. И., Кузнецов Г. Н. Акуст. журн. 2016. 62, № 2. С. 194.
- [4] Belov A. I., Kuznetsov G. N. Phys. Wave Phenom. 2014.
  21, N 3. P. 177.
- [5] Белова Н. И., Кузнецов Г. Н. Ученые записки физического ф-та Московского ун-та. 2017. № 5..
- [6] Nelder J. A., Mead R. Comp. J. 1965. 7. P. 308.
- [7] Weston D. E. J. Acoust. Soc. Am. 1960. 65, N 2. P. 647.

# The attenuation of sound pressure and orthogonal projection of vector of the vibrational acceleration in shallow water

A. I. Belov<sup>*a*</sup>, G. N. Kuznetsov<sup>*b*</sup>

Wave Research Center at General Physics Institute. Moscow 119991, Russia E-mail: <sup>a</sup>belov-ai@mail.ru, <sup>b</sup>skbmortex@mail.ru

Studies of the spatial attenuation of the low-frequency vector-scalar sound fields in shallow water performed using a towed pneumo-gun and four-component vector-scalar receivers. Experimental data and calculated on the basis of the acoustic calibration waveguide of laws decay of sound pressure and orthogonal vector projections of the vibrational acceleration showed that the vertical projection of the vector vibrational acceleration decreases significantly faster than the sound pressure field.

## PACS: 43.30.+m

*Keywords*: sound pressure attenuation, horizontal and vertical projections of the vector of the vibrational acceleration. *Received 26 July 2017*.

## Сведения об авторах

- 1. Белов Александр Иванович ст. науч. сотрудник; тел.: (499) 256-17-90, e-mail: belov-ai@mail.ru.
- 2. Кузнецов Геннадий Николаевич канд. физ.-мат. наук, начальник СКБ «Морские технологии», профессор; тел.: (499) 256-17-90, e-mail: skbmortex@mail.ru.

Γ