
Численная оценка законов убывания и интерференционной структуры полей давления и колебательной скорости в волноводах морского шельфа

*В.А. Лисютин, О.Р. Ластовенко, К.А. Рыбакова, А.Д. Дегтяр, Н.В. Петренко,
Е.В. Савченко*

Севастопольский государственный университет, Севастополь

Аннотация: Статья посвящена анализу пространственной структуры акустических полей давления и колебательной скорости в гидроакустических волноводах морского шельфа. Рассматриваются волноводы с двумя типами профиля скорости звука: постоянным и имеющим подводный звуковой канал. Дно предполагается в виде переходного слоя с градиентом скорости звука и полупространства. Акустические характеристики слоя принимаются соответствующими илу или песку. Анализируется интерференционная структура поля давления и поля вертикальной компоненты колебательной скорости. Анализируются пространственные законы убывания полей давления и колебательной скорости. Показывается, что интерференционная структура и законы убывания поля давления и вертикальной компоненты колебательной скорости не совпадают.

Ключевые слова: нормальные волны, колебательная скорость, морское дно, интерференционная структура, некогерентное сложение.

Введение. В скором времени научно-исследовательское судно Пионер-М приступит к изучению ресурсов шельфа Черного моря и Азовского моря [1]. Кроме пространственно-частотной структуры полей давления (ПД) $p(r,z,f)$ значительное внимание уделяется также изучению значимости информации, заключенной в аналогичной структуре полей горизонтальной v_r и вертикальной v_z компонент вектора колебательной скорости (КС) [2,3]. Закон пространственного затухания является важным фактором как для решения прямых (подводное наблюдение, навигация) [4,5], так и обратных задач акустики мелкого моря – восстановления свойств дна [6–8].

Пространственная структура, законы спадания полей КС в ближней, средней и дальней от источника зонах в простом волноводе Пекериса исследовались в работе [9]. Аналитически получены величины показателей в степенном законе ослабления полей. Однако, акустические свойства дна для проведения оценок выбирались произвольно, а глубина волновода полагалась

равной 200 м. Конечно, для случая волновода Пекериса, обладающего свойством «автомодельности» глубина может быть положена любой, результата это не изменит [10,11]. В реальности же в волноводе глубиной 200 м. на закон спадания будет влиять еще и профиль скорости звука (ПСЗ), и свойства дна и глубина расположения источника.

Целью настоящей статьи является численная оценка законов спадания ПД и компонент КС в мелководном волноводе типа Азовского моря и в шельфовом волноводе с подводным звуковым каналом Черноморского типа при вариациях глубины расположения источника и свойств дна. Дно предполагается состоящим из переходного слоя ила или песка с градиентом скорости звука и полупространства.

Постановка задачи. Для расчетов ПД в волноводе использовался метод нормальных волн и численная процедура, алгоритм которой описан в монографии [12] и реализован в виде программы «KRAKENC» [13].

Поле давления в зависимости от расстояния r , глубины z и частоты f представляется в виде: $p(r, z, f) = \sum_{l=1}^N p_l(r, z, f) = \sum_{l=1}^N \varphi_l(z, f) H_0^{(1)}(\xi_l, r)$, где $p_l(r, z, f)$ – поля давления отдельных мод, $\varphi_l(z, f)$ – нормированные вертикальные профили мод, $H_0^{(1)}(\xi_l, r)$ – функция Ханкеля, ξ_l – горизонтальное волновое число, N – число распространяющихся на частоте f мод. Все обозначения, принятые здесь совпадают с работами [10,11].

Поле компонент КС нормальных волн нетрудно вычислить с помощью дифференциальной связи между КС и давлением [2,14], тогда:

$$v_z(r, z, f) = -i(\omega c p^2)^{-1} \sum_{l=1}^N v_{z_l}(r, z, f) = -i(\omega c p^2)^{-1} \sum_{l=1}^N b_l \frac{\partial \varphi_l(z, f)}{\partial z} H_0^{(1)}(\xi_l, r),$$

b_l – вертикальное волновое число в водном слое,

$$v_r(r, z, f) = -i(\omega c p^2)^{-1} \sum_{l=1}^N v_{r_l}(r, z, f) = -i(\omega c p^2)^{-1} \sum_{l=1}^N \xi_l \varphi_l(z, f) H_1^{(1)}(\xi_l, r).$$

Для возможности сопоставления уровней потерь при распространении ПД и КС поля КС приведены к единице измерения ПД.

На горизонтальных разрезах поля (рис.1) на вертикальной оси показан уровень потерь TL (TL – transmission loss) – уровень поля, нормированный на расстоянии 1 м от источника.

Рассмотрим вначале векторные поля в мелководном волноводе типа Азовского моря. В этом случае можно взять за основу модель волновода Пекериса с глубиной 20 м и дном в виде полупространства: $\rho_H = 2000 \text{ кг/м}^3$, $c_H = 1700 \text{ м/с}$, тангенс потерь $\beta_H = 0,03$ [15].

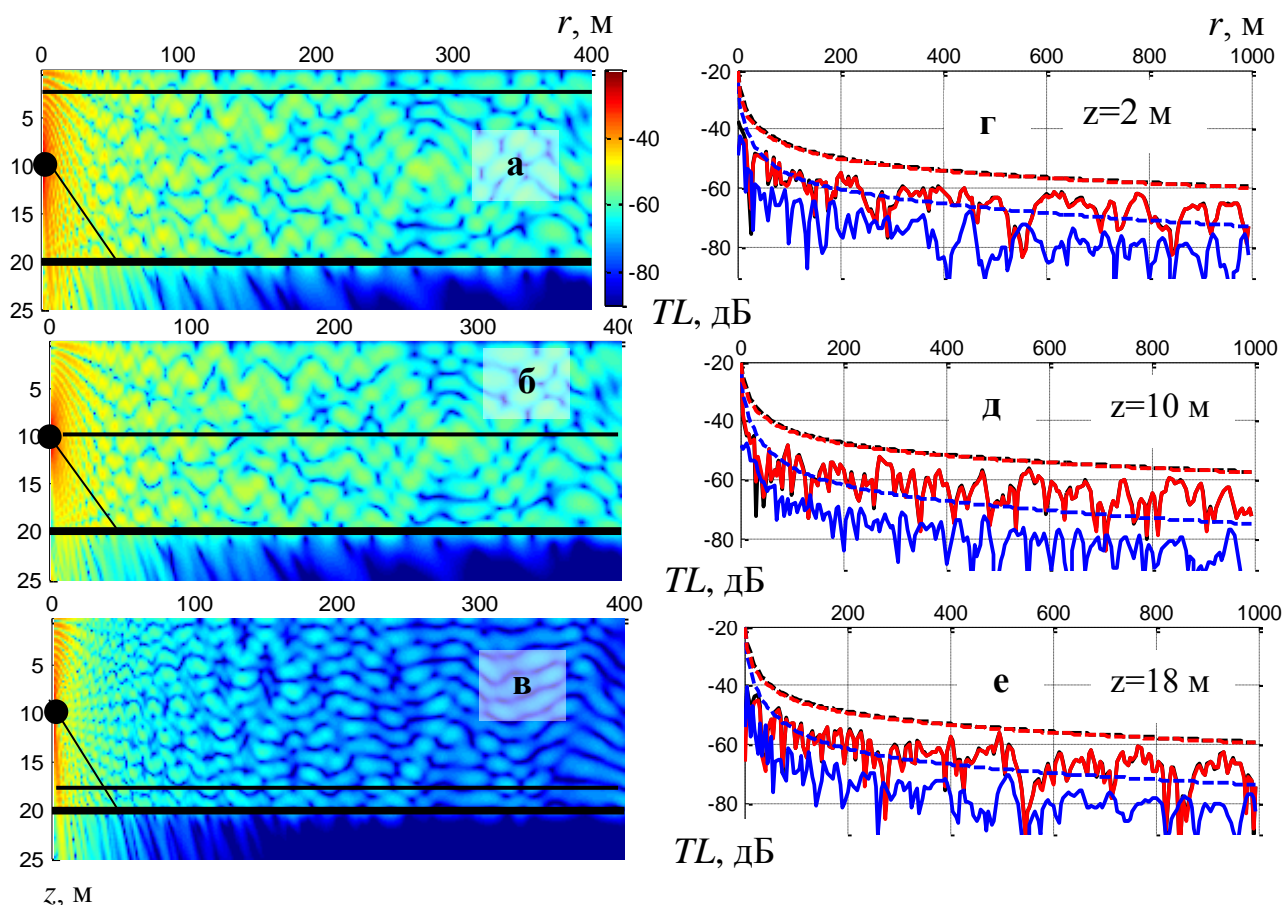


Рис.1. Яркостные картины ПД и КС и горизонтальные разрезы;
а) – ПД, б) – горизонтальная компонента КС, в) – вертикальная компонента КС;
г–е) – горизонтальные разрезы полей на различных глубинах: (—) ПД, (---) горизонтальная, (····) вертикальная составляющие КС, пунктир – некогерентное сложение нормальных волн

Картины поля давления, поля вектора горизонтальной и вертикальной составляющих КС, и горизонтальные разрезы на различных глубинах в случае многомодового характера распространения показаны на рис. 1. Частота - 1000 Гц, 26 мод, предельный угол скольжения на границе водный слой – дно $\chi_c = \arccos(1500/1700) \approx 9.3^\circ$, отмечен кривой линией, исходящей из источника. Для расстояний до источника, для которых $\chi > \chi_c$, хорошо заметно интенсивное излучение энергии мод в полупространство.

Важный для решения задачи практической гидроакустики вопрос – оценка относительного уровня акустического давления $p(r,z)$ и компонент КС $v_r(r,z)$ и $v_z(r,z)$. Как видно из рис. 1, пространственная структура и относительные уровни $p(r,z)$ и $v_r(r,z)$ практически совпадают, а уровень поля $v_z(r,z)$ оказывается существенно ниже при совершенно отличной пространственной структуре. Разница в уровнях полей $p(r,z)$ и $v_z(r,z)$ нарастает с увеличением дистанции и при $r=1000$ м достигает примерно 12 дБ, причем наибольшая разница – посередине волновода, на глубине расположения источника. Общее снижение уровня ≈ 60 дБ для давления и горизонтальной составляющей КС и ≈ 73 дБ для вертикальной составляющей КС. Вблизи источника вертикальная составляющая КС имеет почти нулевое значение, что показывает сферический характер формирующейся волны. В целом сделанные здесь выводы соответствуют работе [3].

Рассмотрим теперь акустические поля в шельфовом волноводе Черного моря. Ось Черноморского подводного звукового канала в шельфовых районах с глубинами до 200 м расположена примерно на глубине 50 м. Профиль скорости звука, характерный для Черноморского ПЗК, показан на рис. 2. Поскольку Черноморский ПЗК относится к каналам термического типа, его верхняя граница расположена в деятельном слое вод, сезонно изменчива, а возрастание скорости звука обусловлено исключительно термической составляющей. Следует отметить, что для шельфа $c(z=h) < c(z=0)$

– скорость звука в воде около дна меньше скорости звука вблизи поверхности, волновод является «открытым» в сторону нижней границы, вследствие чего вопрос о влиянии дна на структуру акустического поля остается актуальным.

На рис. 3 представлена структура полей давления (только горизонтальные разрезы), горизонтальной и вертикальной составляющих КС для «трехмодового» волновода, частота 20 Гц, источник – на оси канала, дно – песок. Глубина водного слоя волновода принята $h=160$ м, толщина промежуточного градиентного слоя $d=20$ м.

Общее снижение уровня поля на десятикилометровой дистанции при некогерентном сложении мод составляет: на глубине $z=50$ м (ось канала) $TL_{p,r} \approx -77$ дБ, на глубине $z=150$ м $TL_{p,r} \approx -78$ дБ, на глубине $z=10$ м $TL_{p,r} \approx -85$ дБ. Такое распределение давления по глубине характерно для мелкого моря, когда ПСЗ практически не оказывает влияния.

Разница в уровнях $TL_{p,r}$ и TL_z на оси канала и ниже почти обычна, и составляет ≈ 20 дБ, интерференционная структура полей давления и КС на оси канала различна, вблизи дна почти одинакова – минимумам поля давления соответствуют и минимумы вертикальной составляющей КС. Исключение составляет приповерхностный слой глубин до 20 м – здесь $TL_{p,r} \approx TL_z$ не только при некогерентном сложении, но и совпадает интерференционная структура поля.

Влияние 3-й моды на структуру акустического поля сказывается до расстояний $r \approx 10$ км, после чего структура поля существенно упрощается.



Рис.2. Профиль скорости звука с ПЗК Черноморского типа

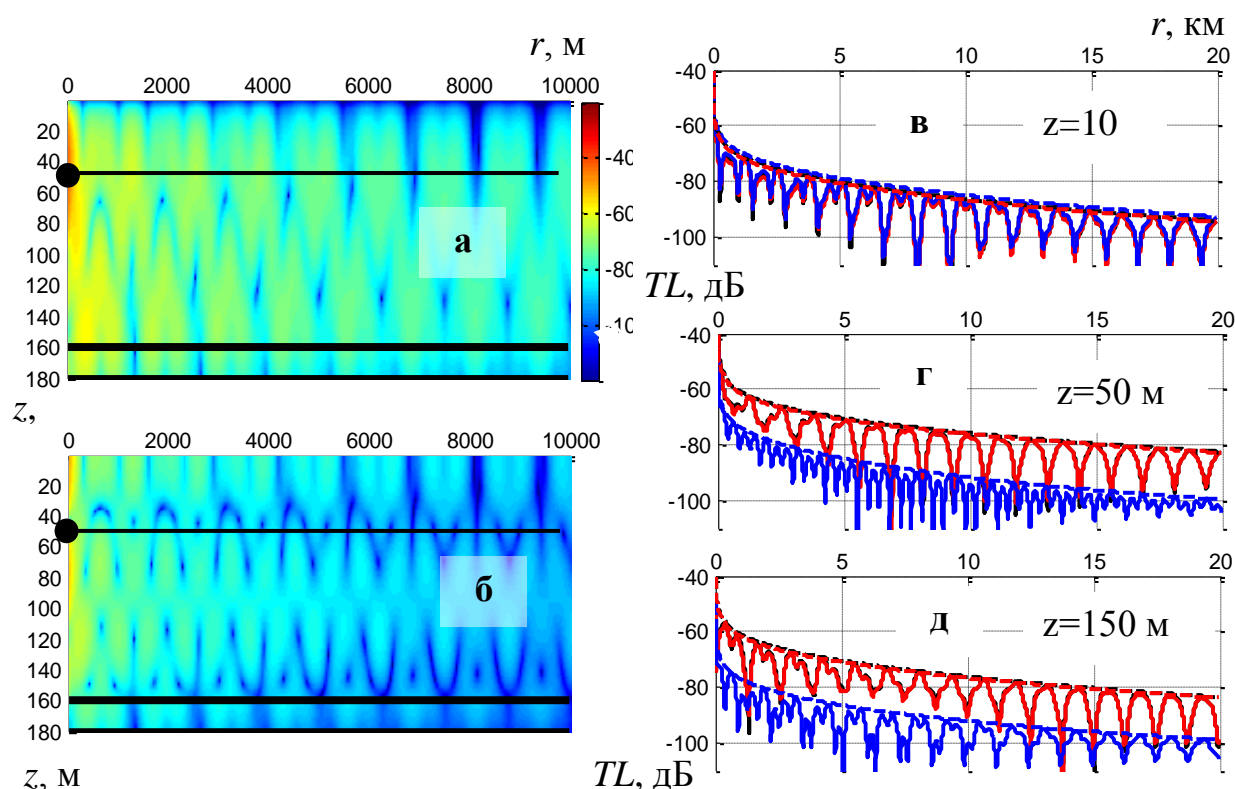


Рис.3. Яркостные картины полей компонент КС и горизонтальные разрезы; а) – горизонтальная компонента КС, б) – вертикальная компонента КС; в–г) – горизонтальные разрезы полей на различных глубинах: (—) ПД, (—) горизонтальная, (—) вертикальная составляющие КС, пунктир – некогерентное сложение нормальных волн

Структура многомодового поля горизонтальной и вертикальной составляющих КС (200 Гц, 61 мода) и разрезы на тех же глубинах показаны на рис. 4 – песчаное дно и рис. 5 – илистое дно.

Промежуточный слой – песок. Общее снижение уровня поля на десятикилометровой дистанции при некогерентном сложении мод составляет: на оси канала $TL_{p,r} \approx -68$ дБ, на глубине $z=150$ м $TL_{p,r} \approx -78$ дБ, на глубине $z=10$ м $TL_{p,r} \approx -95$ дБ. Такое распределение давления по глубине характерно для случая, когда определяющее влияние на поле оказывает ПСЗ, а характер дна практически не оказывает влияния. Разница в уровнях $TL_{p,r}$ и TL_z на оси канала наибольшая, и составляет ≈ 30 дБ ($r=20$ км), при смещении

от оси канала уменьшается – вблизи поверхности до ≈ 15 дБ и ≈ 25 дБ вблизи дна, причем с ростом дистанции разница в уровнях уменьшается вблизи поверхности и увеличивается вблизи дна.

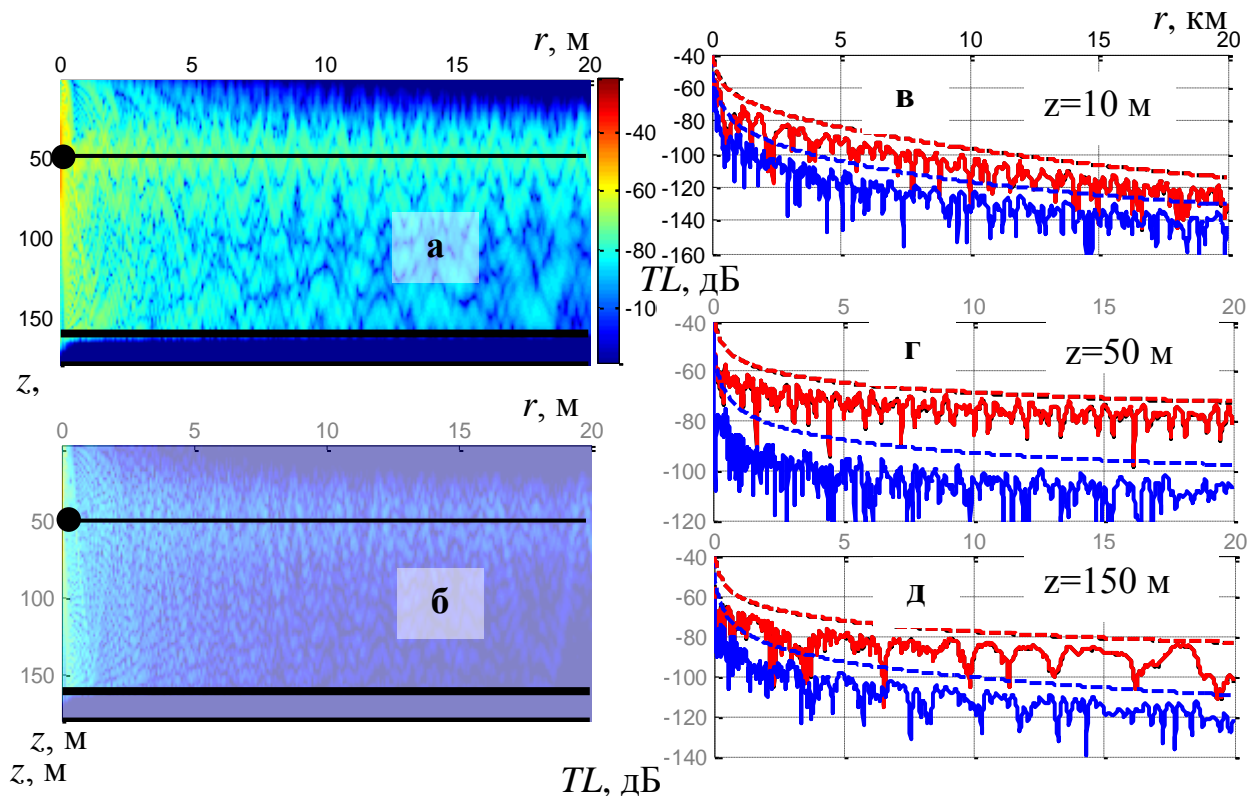


Рис.4. Картины полей компонент КС и горизонтальные разрезы;

а) – горизонтальная компонента КС, б) – вертикальная компонента КС;

в–г) – горизонтальные разрезы полей на различных глубинах: (—) ПД,

(—) горизонтальная, (—) вертикальная составляющие КС,

пунктир – некогерентное сложение нормальных волн.

Промежуточный слой – песок. Частота 200 Гц, 61 мода

Промежуточный слой – ил. Общее снижение уровня поля на десятикилометровой дистанции при некогерентном сложении мод составляет: на оси канала $TL_{p,r} \approx -70$ дБ, на глубине $z=150$ м $TL_{p,r} \approx -98$ дБ, на глубине $z=10$ м $TL_{p,r} \approx -130$ дБ. На первых десяти километрах не на оси

канала снижение уровня поля оказывается значительным, вследствие высвечивания высших мод. На больших дистанциях интерференционная структура поля значительно упрощается и соответствует распространению двух захваченных каналом мод. Разница в уровнях $TL_{p,r}$ и TL_z на оси канала ≈ 30 дБ ($r=20$ км). Вблизи поверхности разница в уровнях $TL_{p,r}$ и TL_z сначала увеличивается с ростом дистанции, затем уменьшается до ≈ 10 дБ.

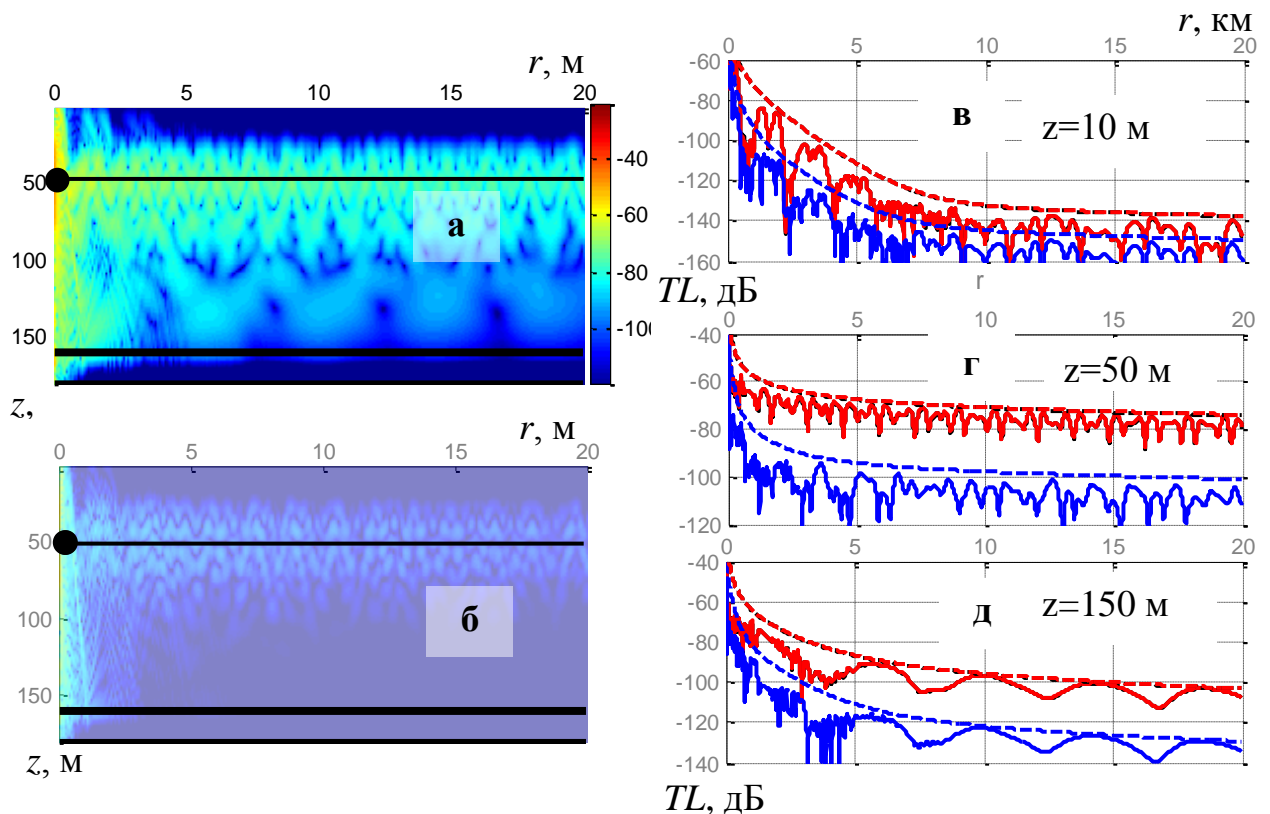


Рис.5. Картины полей компонент КС и горизонтальные разрезы;
а) – горизонтальная компонента КС, б) – вертикальная компонента КС;
в–г) – горизонтальные разрезы полей на различных глубинах: (—) ПД,
(—) горизонтальная, (—) вертикальная составляющие КС,
пунктир – некогерентное сложение нормальных волн.

Промежуточный слой – ил. Частота 200 Гц

Выводы. Методом математического экспериментирования показано, что в случае распространения большого количества нормальных волн вертикальная компонента КС имеет уровень значительно (на 20 дБ и более) меньший по сравнению с горизонтальной компонентой КС и полем давления. Быстрота спада уровней вертикальной компоненты КС с увеличением расстояния превышает быстроту спада поля давления и зависит от ПСЗ, глубины расположения источника звука и акустических свойств дна. Наиболее неблагоприятный случай – илистое дно. Устанавливаются усредненные законы спада давления и КС и соотношение между величинами ослабления $TL_{p,r}$ и TL_z , которое в среднем составляет $TL_{p,r} - TL_z \approx 25$ дБ. Для рефракционного волновода с ПЗК разница максимальна на оси канала и минимальна вблизи поверхности.

Практическая регистрация интерференционной структуры поля вертикальной компоненты КС с помощью векторных приемников будет значительно осложнена существенно более низким уровнем последней по сравнению с полем давления и горизонтальной компонентой КС и возможностью отклонения приемника КС от вертикали. Как следствие, сигнал вертикальной компоненты КС будет зашумляться, маскироваться более сильным сигналом горизонтальной компоненты КС. Для целей геоакустической инверсии по этим причинам информация, заключенная в сигналах вертикальной компоненты КС, вряд ли окажется извлекаемой и полезной.

Литература

1. Вузы РФ от Калининграда до Дальнего Востока планируют участие в экспедициях на «Пионер-М». URL: sevsu.ru/novosti/item/vuzy_rf_ot_kaliningrada_do_dalnego_vostoka_planiruyut_u_chastie_v_ekspeditsiyakh_na_pioner_m/ (дата обращения 23.08.2022)

2. Щуров В.А. Движение акустической энергии в океане. Владивосток: ТОИ ДВО РАН. 2019. 204 с.
 3. Кузнецов Г.Н., Степанов Г.Н. Закономерности ослабления векторно-скалярных звуковых полей в зонах интерференционных максимумов // Акуст. журн. 2019. Т. 65. № 2. С. 203–213.
 4. Кузнецов Г.Н., Степанов Г.Н. Пространственная векторно-скалярная структура низкочастотных полей мультипольных источников в зонах интерференционных максимумов // Акуст. журн. 2020. Т. 66. № 3. С. 294–307.
 5. Касаткин Б.А., Касаткин С.Б., Косарев Г.В. Пространственно-частотная и пространственно-временная структура звукового поля в скалярно-векторном описании // Подводные исследования и робототехника. 2020. № 3 (33). С. 46–57.
 6. Белов А.И., Кузнецов Г.Н. Оценка акустических характеристик поверхностных слоев морского дна с использованием четырехкомпонентных векторно-скалярных приемников // Акуст. журн. 2016. Т. 62. № 2. С. 194–202.
 7. Dahl P.H., Dall'Osto D.R. Range-dependent inversion for seabed parameters using vector acoustic measurements of underwater ship noise // IEEE J. Ocean. Eng. 2022. V. 47, N. 3. pp. 680–689.
 8. Dahl P. H., Dall'Osto D. R. Estimation of seabed properties and range from vector acoustic observations of underwater ship noise // J. Acoust. Soc. Am. 2020. V. 147. N. 4. pp. EL345–EL350.
 9. Кузнецов Г.Н., Степанов Г.Н. Приближенные аналитические представления законов спадания векторно-скалярных полей мультипольных источников в волноводе Пекериса // Акуст. журн. 2017. Т. 63. № 6. С. 623–636.
 10. Лисютин В.А., Ластовенко О.Р., Гайдук С.В., Дубков Е.А.. Оценка адекватности модели гидроакустического волновода с жидким дном
-

в расчетах импульсных звуковых полей // Инженерный вестник Дона, 2020, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2020/6331.

11. Лисютин В.А., Ластовенко О.Р., Довгаленко В.В., Лучин В.Л., Петренко Н.В. Метод симуляции импульсной характеристики горизонтально-слоистого гидроакустического волновода с жидким дном // Инженерный вестник Дона, 2020, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2020/6281.

12. Jensen F. B., Kuperman W. A., Porter M. B., Schmidt N. Computational Ocean Acoustics. – N. – Y.: AIP Press. 1994. 578 p.

13. Underwater acoustic propagation modelling software – AcTUP V2.2L. URL: cmst.curtin.edu.au/products/underwater / (дата обращения 08.09.22).

14. Елисеевнин В.А. Тужилкин Ю.И. Поток акустической мощности в волноводе // Акуст. журн. 2001. Т.47. № 6. С. 781–788.

15. Лисютин В.А. Ластовенко О.Р. Оценка влияния внутреннего и вязкого трения на дисперсию и затухание звука в неконсолидированных морских осадках // Акуст. журн. 2020. Т. 66. № 4. С. 420–436.

References

1. Vuzy rf ot kaliningrada do dalnego vostoka planiruyut uchastie v ekspeditsiyakh na Pioneer M [Universities of the Russian Federation from Kaliningrad to the Far East are planning to participate in expeditions to Pioneer M]. URL: sevsu.ru/novosti/item/vuzy_rf_ot_kaliningrada_do_dalnego_vostoka_planiruyut_uchastie_v_ekspeditsiyakh_na_pioner_m / (date of assess 23.08.2022).
2. Shchurov V.A. Dvizheniye akusticheskoy energii v okeane. [The movement of acoustic energy in the ocean]. Vladivostok: TOI DVO RAN. 2019. 204 p.
3. Kuznetsov G. N., Stepanov A.N. Acoust. Phys. 2019. V. 65. N. 2. pp. 190–199.

4. Kuznetsov G. N., Stepanov A.N. *Acoust. Phys.* 2020. V. 66. N. 3. pp. 277–289.
5. Kasatkin B.A., Kasatkin S.B., Kosarev G.V. *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika.* 2020. № 3 (33). pp. 46–57.
6. Belov A. I., Kuznetsov G. N. *Acoust. Phys.* 2016. V. 62. N. 2. pp. 194–201.
7. Dahl P.H., Dall'Osto D.R. *IEEE J. Ocean. Eng.* 2022. V. 47. N. 3. pp. 680–689.
8. Dahl P. H., Dall'Osto D. R. *J. Acoust. Soc. Am.* 2020. V. 147. N. 4. pp. EL345–EL350.
9. Kuznetsov G. N., Stepanov A.N. *Acoust. Phys.* 2017. V. 63. N. 6. pp. 660 – 672.
10. Lisyyutin V.A., Lastovenko O.R., Gayduk S.V., Dubkov Ye.A. *Inzhenernyj vestnik Dona.* 2020. №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2020/6331.
11. Lisyyutin V.A., Lastovenko O.R., Dovgalenko V.V., Luchin V.L., Petrenko N.V. *Inzhenernyj vestnik Dona.* 2020. №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2020/6281.
12. Jensen F. B., Kuperman W. A., Porter M. B., Schmidt H. *Computational Ocean Acoustics.* N. Y.: AIP Press. 1994. 578 p.
13. Underwater acoustic propagation modelling software – AcTUP V2.2L. URL: cmst.curtin.edu.au/products/underwater/ (accessed 08.09.22).
14. Yeliseyevnin V.A. Tuzhilkin YU.I. *Akust. zhurn.* 2001. T.47. № 6. pp. 781–788.
15. Lisyyutin V.A. Lastovenko O.R. *Acoustical Physics* 2020. V. 66. N.4. pp. 401–415. doi.org/10.1134/S1063771020040065.