

Комплексное применение лучевого и волнового подходов к расчетам звуковых полей в условиях узкого волновода на шельфе Черного моря

В. А. Лисютин*, О. Р. Ластовенко, А. А. Ярошенко

Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

*e-mail: vlisiutin@mail.ru

Поступила: 14.10.2019 г.; принята к публикации 21.02.2020 г.; опубликована 25.03.2020 г.

Целью настоящей статьи является исследование возможности комплексного применения лучевого и волнового методов для оценки интенсивности подводного акустического поля в условиях мелкого моря при различных типах донных осадков и различных локализациях источника звука. Рассматривается гидроакустический волновод с профилем скорости звука, содержащим узкий придонный и слабо выраженный приповерхностный звуковые каналы. Предполагается два типа морского дна – илистое и песчаное – и два случая расположения источника – приповерхностное и придонное. Для вычисления акустического поля применяются два подхода – с использованием лучевого метода и метода нормальных волн. Принимается, что лучевой метод более соответствует диапазону высоких частот, метод нормальных волн – диапазону низких частот. Показывается, что с увеличением частоты вертикальный профиль нормальных волн концентрируется в области глобального минимума на профиле скорости звука. Анализируются дисперсионные характеристики нормальных волн и коэффициенты их затухания. Показывается, что наименьшая групповая скорость нормальной волны соответствует наибольшему коэффициенту затухания, что объясняется существенным взаимодействием с дном. Вычисленные уровни звукового поля в водном слое применяются для оценки уровня поля источника звука, травматичного для придонной фауны. Установлено, что в случае профиля скорости звука с двумя звуковыми каналами и расположения источника на оси узкого волновода лучевой метод расчета закона спада силы звука с расстоянием дает систематическое занижение уровня поля.

Ключевые слова: профиль скорости звука, метод нормальных волн, лучевой метод, морские осадки, фазовая скорость, морские беспозвоночные.

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и города Севастополь в рамках научного проекта № 18-42-920001.

Для цитирования: Лисютин В. А., Ластовенко О. Р., Ярошенко А. А. Комплексное применение лучевого и волнового подходов к расчетам звуковых полей в условиях узкого волновода на шельфе Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 1. С. 91–102. doi:10.22449/2413-5577-2020-1-91-102

© Лисютин В. А., Ластовенко О. Р., Ярошенко А. А., 2020



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

Complex Application of Ray and Wave Approaches to Sound Field Calculations in a Narrow Waveguide on the Black Sea Shelf

V. A. Lisyutin*, O. R. Lastovenko, A. A. Yaroshenko

Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

*e-mail: vlisyutin@mail.ru

Submitted 14.10.2019; revised 21.02.2020; published 25.03.2020

This article deals with study of combined use of ray and wave methods for assessment of underwater sound field intensity in shallow water given different types of sediments and different sound localizations. A hydroacoustic waveguide is considered with a sound velocity profile containing a narrow near-bottom and weakly pronounced near-surface sound channels. Two types of seabed are considered: silty and sandy, and two cases of source location: near-surface and near-bottom. Two approaches are used to calculate the acoustic field: the ray method and normal wave method. It is accepted that the ray method is more consistent with the high frequency range, whereas the normal wave method is more consistent with the low frequency range. It is shown that as the frequency increases, the vertical profile of normal waves concentrates in the region of global minimum on the sound velocity profile. The dispersion characteristics of normal modes and their attenuation coefficients are analyzed. It is shown that the smallest group velocity of a normal mode corresponds to the largest attenuation coefficient, which is explained by a significant interaction with the bottom. The calculated sound field levels in the water layer are used to estimate the field level of a sound source that is traumatic for benthic fauna. It is shown that in case of a sound velocity profile with two sound channels and source location on the axis of a narrow waveguide, the ray method for calculation of the pattern of sound strength decay with distance gives a systematic underestimation of the field level.

Keywords: sound velocity profile, normal wave method, ray method, marine sediments, phase velocity, marine invertebrates.

Acknowledgments: the research is performed under scientific project No. 18-42-920001 and funded by the Russian Foundation for Basic Research and city of Sevastopol.

For citation: Lisyutin, V.A., Lastovenko, O.R. and Yaroshenko, A.A., 2020. Complex Application of Ray and Wave Approaches to Sound Field Calculations in a Narrow Waveguide on the Black Sea Shelf. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 91–102. doi:10.22449/2413-5577-2020-1-91-102 (in Russian).

Введение. Шельфовая часть Черного моря отличается разнообразием ресурсов: природных, рекреационных, историко-культурных. Особо следует отметить ресурсы биологические – ценных промысловых рыб и морских беспозвоночных, служащих источником пищи как для рыб, так и для человека. Местом обитания и выведения потомства некоторых рыб и ракообразных является морское дно. Подводные звуки, создаваемые деятельностью человека, могут нанести вред всей подводной фауне. Шум могут генерировать различные источники: суда, гидролокаторы, техника, проводящая дноуглубительные работы, сваебойные установки на стройках, импульсы пневмопушек сейсморазведки [1].

Как известно, акустическая энергия концентрируется в областях, в которых на вертикальном профиле скорости звука имеются минимумы – звуковые каналы. Уровни звукового давления, колебательной скорости и их произведения – плотности потока мощности – внутри каналов могут многократно превосходить аналогичные показатели, осредненные по всему водному слою [2].

В северо-западной части черноморского шельфа подводный звуковой канал в классическом представлении не существует. Однако в районах с преимущественно песчаным дном на профиле скорости звука (ПСЗ) иногда наблюдаются придонные узкополосные аномалии. Контрастность узкого волновода подчеркивается располагающейся выше антиволноводной аномалией. Дно моря в районах, где фиксируются придонные аномалии, сложено осадками в виде песка и (реже) ила [3]. В случае илистого дна с высокой пористостью скорость звука в дне может оказаться ниже, чем в воде. Такое вертикальное распределение скорости создает узкий звуковой канал, часть которого располагается в водном, а часть – в донном слое. Нижняя граница канала формируется вследствие увеличения геостатического давления и, соответственно, скорости звука с глубиной.

Для расчетов звуковых полей, в зависимости от частоты колебаний и решаемой задачи, применяется лучевой или волновой метод. Принято считать, что первый метод более соответствует области высоких, а второй – области низких частот [2]. Однако лучевые и волновые компоненты импульсного поля неразделимы. В условиях звукового канала в начале импульсной реализации наблюдаются вступления лучей, распространяющихся без дисперсии в водном слое, в конце реализации – вступления нормальных волн [4]. К сожалению, в настоящее время не существует единой расчетной программы моделирования широкополосного звукового поля, совмещающей достоинства лучевого и волнового подходов. Например, в работе [5] моделирование импульсного поля выполняется с помощью параболического уравнения в диапазоне 10–180 Гц, в работе [6] – в диапазоне до 2 кГц, что можно считать практической верхней границей волнового подхода. В работе [7] используется эффективный, но упрощенный подход – некогерентное суммирование мод и модель волновода Пекериса с изоскоростным слоем и дном в виде полупространства.

Предмет и методы исследования. Целью настоящей статьи является исследование возможности комплексного применения лучевого и волнового методов для оценки интенсивности акустического поля в условиях мелко-масштабного звукового канала при различных типах донных осадков и различных локализациях источника звука. Лучевой подход дает высокочастотную оценку, модовый – ограниченную диапазоном до 2 кГц.

Акустические характеристики морских осадков рассчитывались на основе $GS + EC$ теории межгранулярного трения (теория *Grain Shearing + Effective Compressibility*, или сокращенно $GS + EC$) [8].

Для расчетов использовалась трехслойная модель морского дна. Первый слой – с высоким постоянным градиентом скорости звука и затухания, второй – с низким градиентом, третий слой – полупространство с постоянными акустическими характеристиками. Плотность осадков во всех слоях считалась не зависящей от глубины. Рассматривались два типа морских осадков: 1) ил,

Физические и акустические параметры слоев

Physical and acoustic properties of the layers

| Номер слоя / Layer number | Толщина слоя d , м / Layer d thickness, m | Тип осадков / Sediment type | Скорость звука на верхней/нижней границе слоя, м/с / Sound velocity at upper/bottom layer edge, m/s | Плотность ρ , кг/м ³ / Density ρ , kg/m ³ | Тангенс потерь β на верхней/нижней границе слоя / Loss tangent β at upper/bottom layer edge |
|---------------------------|---|-----------------------------|---|---|---|
| 1 | 10 | 1 | 1460 / 1580 | 1400 | 0 / 0.012 |
| | | 2 | 1540 / 1750 | 2000 | 0 / 0.020 |
| 2 | 20 | 1 | 1580 / 1640 | 1400 | 0.012 / 0.016 |
| | | 2 | 1750 / 1880 | 2000 | 0.020 / 0.027 |
| 3 | ∞ | | 2200 | 2200 | 0.030 |

2) песок. Сдвиговые волны не учитывались. Физические и акустические параметры слоев представлены в таблице, в которой для слоев с градиентами через косую черту указаны значения параметра на верхней и нижней границе слоя.

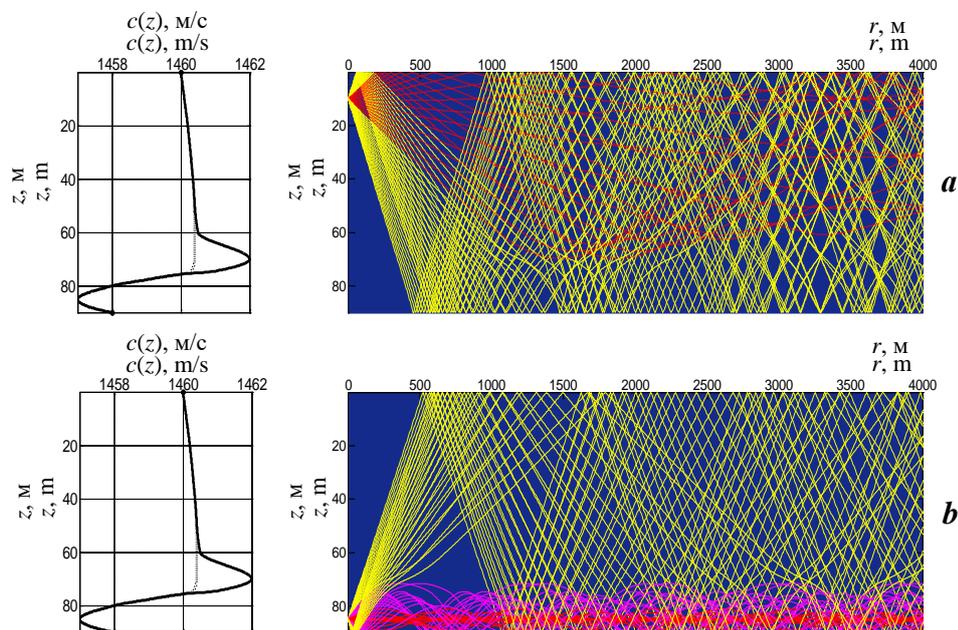
Для расчетов поля в лучевом приближении использовалась программа *BELLHOP*, методом нормальных волн (НВ) – программа *KRAKENC*. Описание алгоритмов можно найти в работе [9], а сами программы доступны на сайте <https://cmst.curtin.edu.au/products/underwater/>. Авторами статьи «тональный» вариант *KRAKENC* был переработан в «широкополосный».

Результаты расчетов. Для проведения численных расчетов отобран ПСЗ, показанный на рис. 1.

Узкий волновод несимметричен, нижней частью он касается дна [3], так что на ПСЗ можно выделить два парциальных волновода: приповерхностный, ограниченный снизу максимумом скорости звука, и водно-донный, верхняя граница которого ограничена максимумом скорости звука, а нижняя граница формируется за счет градиента скорости в дне. Энергия, канализированная приповерхностным волноводом, может распространяться в нем, не взаимодействуя с дном.

На рис. 1 показаны картины лучевых траекторий при расположении источника на глубине $z_0 = 10$ м (имитирует шумы судоходства или пневмопушку) и $z_0 = 85$ м (на оси придонного волновода, имитирует шум забивки свай). Предельный угол скольжения χ_c в приповерхностном волноводом (максимальный угол выхода луча, при котором происходит его захват), измеренный по рис. 1, составляет $\chi_c \approx 2.9^\circ$. Предельный угол скольжения в придонном волноводом $\chi_c \approx 4.5^\circ$.

В верхнем волноводом всего два типа лучей: лучи, рефрагирующие в водном слое, и лучи донно-поверхностных отражений. Из рис. 1 видно, что длина цикла предельного (локализованного только в водном слое) луча в верхнем волноводом составляет $L \approx 3300$ м. В придонном волноводом три типа лучей: каналные, заворачивающие внутри водного слоя; каналные, отраженные от дна; лучи донно-поверхностных отражений.



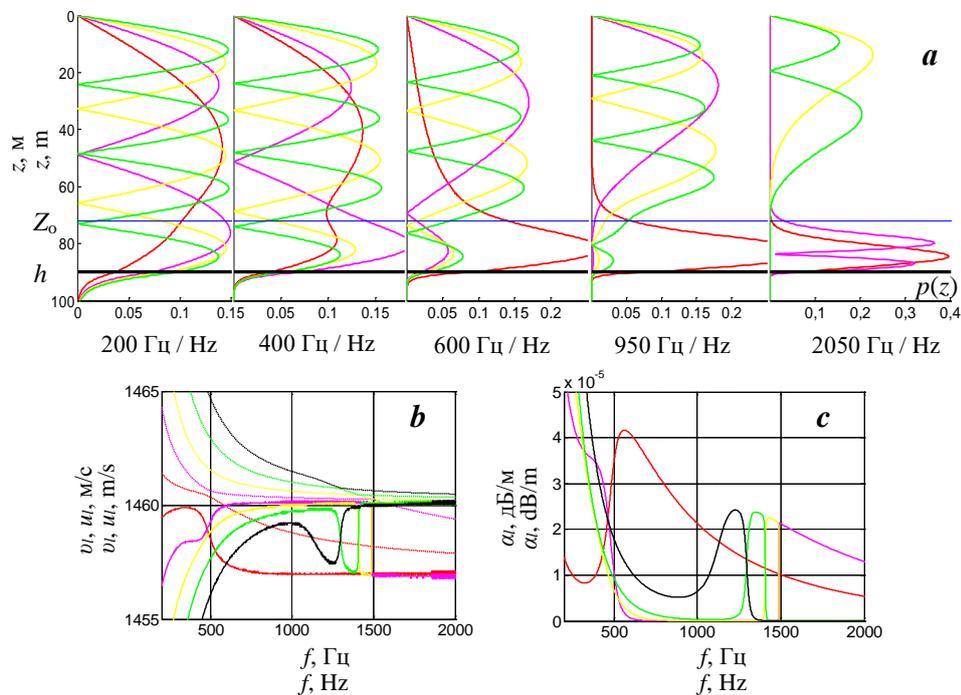
Р и с. 1. Профиль скорости звука и лучевые траектории. Расположение источника: приповерхностное (a); придонное (b)

Fig. 1. Sound speed profile and ray paths. The location of the source is near-surface (a) and near-bottom (b)

Проведенный анализ и наглядные лучевые картины позволяют предположить, что поверхностные источники не опасны для придонной фауны, поскольку плотность лучей около дна невысока и высокочастотные компоненты спектра импульсного поля, формирующие крутые фронты, сосредоточены в водном слое. Наоборот, в случае придонного источника колебания высоких частот концентрируются на оси нижнего канала и частично проникают в дно. Колебания низких частот, ощущаемые как вибрация, равномерно заполняют весь волновод.

Обратимся теперь к методу нормальных волн. Рассмотрим, как изменяется модовая структура поля при увеличении частоты. На рис. 2 показаны нормированные вертикальные профили первых четырех мод (грунт – песок), частотные зависимости фазовой ($v_l = \omega/\text{Re}(\xi_l)$) и групповой ($u_l = \partial\omega/\partial\text{Re}(\xi_l)$) скорости, коэффициентов затухания $\alpha_l = 8.69 \cdot \text{Im}(\xi_l)$, где ξ_l – горизонтальное волновое число. Профили вычислены на пяти частотах: 200 Гц (начинает оказывать влияние ПСЗ), 400 Гц (на октаву выше), 600 Гц ($200 \cdot 3$), 950 Гц (разделение профилей 1-й и 2-й мод по двум парциальным волноводам), 2050 Гц (захват двух мод придонным волноводом). Горизонтальными линиями на рис. 2, a отмечены глубина, соответствующая максимуму скорости на ПСЗ с антиволноводом (синяя линия), и граница водного слоя (черная линия).

На распределение поля моды по глубине и дисперсию фазовой скорости оказывают влияние следующие факторы: концентрация энергии с ростом частоты в области минимумов ПСЗ, утечка акустической энергии в дно. Эти факторы приводят к изменению уровня возбуждения мод.



Р и с. 2. Трансформация профилей мод при увеличении частоты (а); частотные зависимости фазовой и групповой скорости мод (b) и модального коэффициента поглощения (с). 1-я (—), 2-я (—), 3-я (—), 4-я (—), 5-я (—) мода
 Fig. 2. Transformation of mode profiles with increasing frequency (a); frequency dependences of the phase and group velocity modes (b) and modal attenuation coefficient (c). 1st (—), 2nd (—), 3^d (—), 4th (—), 5th (—) mode

На самой низкой частоте профили мод почти соответствуют случаю изоскоростного водного слоя, коэффициенты поглощения с увеличением номера моды возрастают, что свидетельствует о существенном взаимодействии с дном.

При увеличении частоты в два раза дисперсионные свойства волновода уже существенно изменяются, начинается трансформация профиля 1-й моды. Энергия, переносимая модой в диапазоне глубин от z_1 до z_2 , пропорциональна величине $1/|z_2 - z_1| \int_{z_1}^{z_2} |p(z)|^2 dz$, откуда следует, что парциальную энергию, сконцентрированную в частях волновода, расположенных выше и ниже условной границы – максимума на ПСЗ, можно оценить по площади под графиком профиля моды. Из рис. 2, а можно видеть, как энергия, переносимая 1-й и 2-й модой, начинает канализоваться в области минимума ПСЗ. В диапазоне 390–600 Гц частотные зависимости фазовых скоростей (рис. 2, b) сближаются, а групповых – пересекаются, что показывает обмен энергией между модами. На частоте 550 Гц групповая скорость 1-й моды резко уменьшается (рис. 2, b), коэффициент поглощения возрастает (рис. 2, c), достигает максимума и затем монотонно снижается. Это означает, что переносимая модой энергия распространяется уже в окрестности минимума

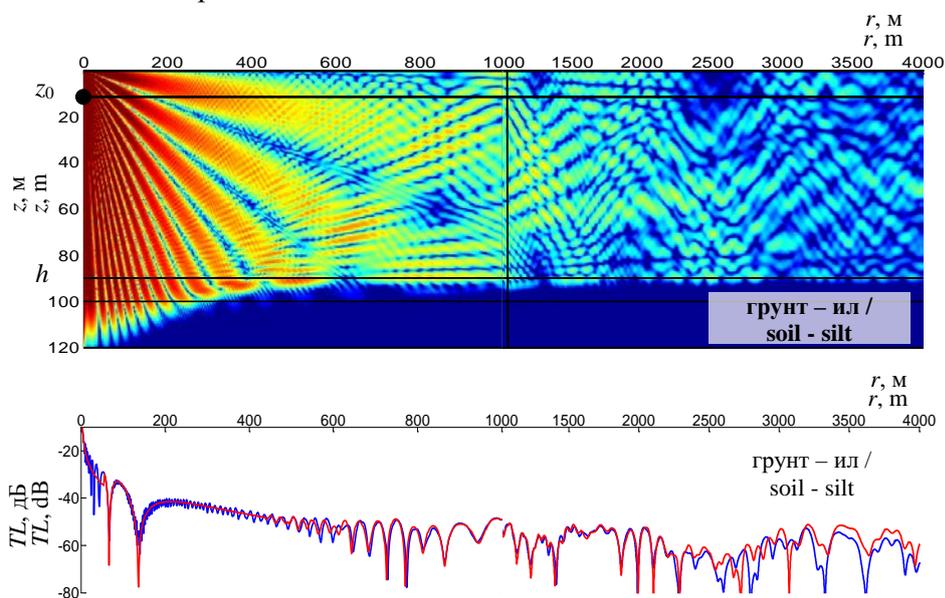
ПСЗ, а взаимодействие с дном по мере «втягивания» моды в звуковой канал постепенно ослабевает.

Показательна трансформация профиля 2-й моды. На частотах свыше 600 Гц возбуждение этой моды в узком канале снижается, и на частоте 700 Гц по внешнему виду профиля становится идентичной с 1-й модой приповерхностного волновода. Следует отметить, что мода свой номер не меняет, изменяется только распределение ее энергии по глубине. Однако такое распределение является неустойчивым, и на частоте 1450 Гц энергия колебаний 2-й моды лавинообразно стекает в направлении придонного минимума ПСЗ. Оба максимума на профиле при этом восстанавливаются, а коэффициент поглощения скачкообразно возрастает.

Для 3-й и 4-й мод процесс перемещения профиля по вертикали аналогичен 2-й моде. С ростом частоты обычный, характерный для волновода мелкого моря профиль с n ($n = 3, 4$) максимумами трансформируется так, что теряется максимум, расположенный в придонной узковолноводной области. Затем восстанавливаются все n максимумов, но уже в придонной области.

Анализ поля мод объясняет сделанные ранее предположения о концентрации высокочастотной энергии в области узкого волновода и дополняет их следующим выводом: концентрация энергии ВЧ будет при любом расположении источника – как придонном, так и приповерхностном.

Структура акустического поля в координатах глубина – дистанция (метод НВ) и горизонтальные разрезы поля показаны на рис. 3. Источник расположен на глубине $z_0 = 10$ м, частота $f = 1000$ Гц. Горизонтальными линиями обозначены границы водного и донных слоев.



Р и с. 3. Картины акустического поля (метод НВ) и разрезы поля на глубине источника (метод НВ (—); лучевой метод (—))

Fig. 3. Acoustic field structure (normal mode method) and field sections at the source depth (normal mode method (—); ray method (—))

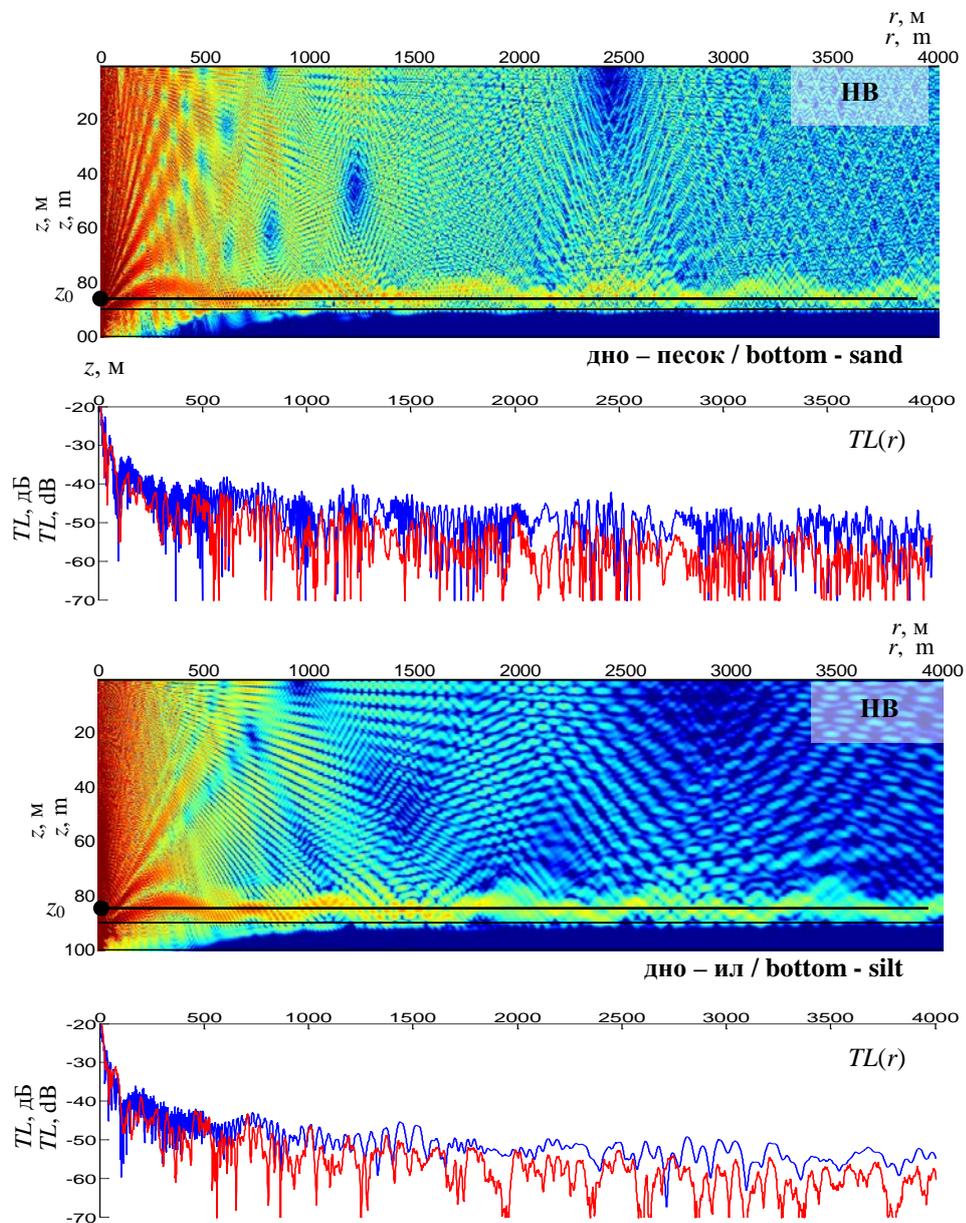
На яркостных картинах поля хорошо видно проникновение акустической энергии в дно при углах скольжения, больших предельного. В случае илистого дна предельным можно считать луч, заворачивающийся в градиентном слое дна и возвращающийся затем в водный, – он отчетливо выделяется на рис. 3. Интенсивная утечка энергии в дно наблюдается при горизонтальных расстояниях вплоть до значений $r \approx 25 h$, после чего интерференционная структура поля значительно упрощается. При больших расстояниях поле формируется 2, 3 и 4-й модами, становится заметным разделение двух парциальных волноводов и снижение проникновения акустической энергии в придонный волновод.

На горизонтальных разрезах поля, рассчитанных лучевым и волновым методом, на вертикальной оси показано ослабление TL (*transmission loss*), нормированное на уровень поля на расстоянии 1 м от источника. В диапазоне расстояний $4.5 h < r < 30 h$ видно замечательное согласие лучевого и волнового методов. При расстояниях $r < 4.5 h$ метод НВ показывает картину интерференции затухающих мод с малым пространственным периодом, лучевой метод – ее отсутствие, но усредненные законы спада акустического давления при этом совпадают. Однако для таких малых расстояний ни один из методов – ни НВ, ни лучевой – не может дать адекватной картины интерференционной структуры поля, поскольку метод НВ не учитывает компоненты поля, соответствующей сплошному спектру горизонтально-волновых чисел, а лучевой метод изначально предполагает ограничение угловой ширины характеристики направленности источника.

Рассмотрим теперь случай расположения источника на оси придонного волновода, частота 2050 Гц (рис. 4). Поскольку определить уровень акустического поля внутри дна возможно только волновым методом, приведена картина расчета поля методом НВ. На горизонтальном разрезе – результаты и волнового, и лучевого расчета. Сравнение разрезов поля, выполненных на основе волнового и лучевого расчета, показывает, что лучевой метод занижает уровень поля примерно на 5 дБ.

Интенсивное проникновение звука внутрь дна наблюдается на расстояниях до 500 м ($\approx 5 h$) в случае песчаного и 1000 м ($\approx 10 h$) – в случае илистого дна. Осредненный уровень поля внутри придонного канала в случае песчаного дна оказывается примерно на 5 дБ выше, чем в случае илистого.

Проведенный расчет позволяет оценить потенциально опасный для придонной фауны уровень шума источника. Здесь под термином «шум» будем понимать звук тональной частоты 2050 Гц. Логарифмический уровень измеряют как $LF = 20 \lg(p/p_0)$, дБ, где p – звуковое давление, Па; $p_0 = 1$ мкПа – опорный уровень. Согласно работе [1], потенциально смертельным является уровень более 207 дБ амплитудного значения, стрессовый уровень приблизительно равен 186 дБ. Возьмем расстояние $r = 500$ м. Согласно рис. 4, на данном расстоянии $TL \approx 40$ дБ (песчаное дно). Тогда $207 + 40 = 247$ дБ – потенциально смертельный уровень источника. Для сравнения: цепочка пневмоисточников создает импульс с уровнем 235–259 дБ (в зависимости от типа); одиночный пневмоизлучатель – 216 дБ (малый), 232 дБ (большой); донный профилограф – до 230 дБ; активный гидролокатор с линейной частотной модуляцией в полосе 0,1–1 кГц – 230 дБ; взрыв – более 270 дБ.



Р и с. 4. Картины акустического поля и разрезы поля на глубине источника (метод НВ (—); лучевой метод (—))

Fig. 4. Acoustic field structure and field sections at the source depth (normal mode method (—); ray method (—))

Выводы. При исследовании звуковых полей в условиях подводного волновода основным вопросом является выбор расчетной модели, адекватной частоте и дистанции. Сложнее всего обстоит дело в условиях двухосевых волноводов, особенно в мелком море при существенном влиянии дна. В лучевом приближении фактором, определяющим пространственную

структуру поля, является ПСЗ. В этом случае потенциальный барьер – максимум на ПСЗ – выступает как непроницаемая граница между двумя парциальными волноводами (рис. 1). С точки зрения волнового подхода абсолютных границ не существует, энергия мод может туннелировать сквозь барьеры, стремясь в область глобального минимума.

В случае приповерхностного источника лучевой и волновой метод показывают замечательное соответствие на дистанциях меньше длины цикла предельного луча с дальнейшим систематическим превышением уровня лучевого расчета относительно волнового (рис. 3). Действительно, моды высших номеров (предельные красные лучи на рис. 1), проникая под барьер (рис. 2), взаимодействуют с дном и с ростом дистанции постепенно «высвечиваются» из волновода.

В случае придонного источника, на оси узкого канала, лучевой метод, наоборот, занижает уровень поля. Кроме того, интерференционная картина на малых расстояниях, где поле формируется множеством мод, передается упрощенно (рис. 4). Связано это со сложностью лучевой программы, требующей для своего применения индивидуальной настройки количества учитываемых лучей в узком угловом диапазоне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Popper A. N., Hawkins A. D.* The importance of particle motion to fishes and invertebrates // *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2018. Vol. 143, iss. 1. P. 470–488. <https://doi.org/10.1121/1.5021594>
2. *Бреховских Л. М., Лысанов Ю. П.* Теоретические основы акустики океана. М. : Наука, 2007. 370 с.
3. *Дивизинюк М. М.* Изменение акустических характеристик шельфовых районов Черного моря постоянными течениями // *Акустичний вісник*. 1999. Т. 2, № 3. С. 42–48.
4. *Лисютин В. А., Ластовенко О. Р., Ярошенко А. А.* Сравнительная оценка вклада лучевых и волновых компонент при распространении импульсных сигналов в подводном звуковом канале Черного моря // *Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества*. 2018. Т. 15, № 2. С. 74–85. doi:10.31429/vestnik-15-2-74-85
5. Методика оценки параметров измеренных на Сахалинском шельфе акустических импульсов для многофакторного анализа их влияния на серых китов / А. Н. Рутенко [и др.] // *Акустический журнал*. 2019. Т. 65, № 5. С. 662–674. doi:10.1134/S0320791919040166
6. *Dahl P. H., Dall'Osto D. R.* On the underwater sound field from impact pile driving: Arrival structure, precursor arrivals, and energy streamlines // *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2017. Vol. 142, iss. 2. P. 1141–1155. <https://doi.org/10.1121/1.4999060>
7. *Lippert T., Ainslie M. A., von Estorff O.* Pile driving acoustics made simple: Damped cylindrical spreading model // *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2018. Vol. 143, iss. 1. P. 310–317. <https://doi.org/10.1121/1.5011158>
8. *Лисютин В. А.* Обобщенная реологическая модель неконсолидированных морских осадков с внутренним трением и эффективной сжимаемостью // *Морской гидрофизический журнал*. 2019. Т. 35, № 1. С. 85–100. doi:10.22449/0233-7584-2019-1-85-100
9. *Computational Ocean Acoustics / F. B. Jensen [et al.].* N.–Y. : AIP Press, 1994. 578 p.

Об авторах:

Лисиутин Виктор Александрович, доцент кафедры физики, СевГУ (99053, Россия, г. Севастополь, ул. Университетская, д. 33), кандидат физико-математических наук, доцент, vlisiutin@mail.ru

Ластовенко Ольга Ростиславовна, доцент кафедры высшей математики, СевГУ (99053, Россия, г. Севастополь, ул. Университетская, д. 33), кандидат физико-математических наук, доцент

Ярошенко Александр Александрович, профессор кафедры высшей математики, СевГУ (99053, Россия, г. Севастополь, ул. Университетская, д. 33), доктор физико-математических наук, профессор, yaroshenko_e_a@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Лисиутин Виктор Александрович – общий замысел, написание статьи

Ластовенко Ольга Ростиславовна – помощь при выполнении расчетов

Ярошенко Александр Александрович – подготовка обзора литературы, обсуждение статьи

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Popper, A.N. and Hawkins, A.D., 2018. The Importance of Particle Motion to Fishes and Invertebrates. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 143(1), pp. 470–488. <https://doi.org/10.1121/1.5021594>
2. Brekhovskikh, L.M. and Lysanov, Yu.P., 2003. *Fundamentals of Ocean Acoustics*. New York: Springer, 279 p. doi:10.1007/b97388
3. Divizinyuk, M.M., 1999. Changes in Acoustical Characteristics of the Shelf Regions of the Black Sea Caused by Constant Streams. *Acoustic Bulletin*, 2(3), pp. 42–48 (in Russian).
4. Lisiutin, V.A., Lastovenko, O.R. and Yaroshenko, A.A., 2018. The Comparative Evaluation of the Ray and Wave Components Contribution to the Impulse Signals Propagation of the Black Sea Underwater Sound Channel. *Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation*, 15(2), pp. 74–85. <https://doi.org/10.31429/vestnik-15-2-74-85> (in Russian).
5. Rutenko, A.N., Gritsenko, V.A., Kovzel, D.G., Manulchev, D.S. and Fershalov, M.Yu., 2019. A Method for Estimating the Characteristics of Acoustic Pulses Recorded on the Sakhalin Shelf for Multivariate Analysis of their Effect on the Behavior of Gray Whales. *Acoustical Physics*, 65(5), pp. 556–566. <https://doi.org/10.1134/S106377101904016X>
6. Dahl, P.H. and Dall'Osto, D.R., 2017. On the Underwater Sound Field from Impact Pile Driving: Arrival Structure, Precursor Arrivals, and Energy Streamlines. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 142(2), pp. 1141–1155. <https://doi.org/10.1121/1.4999060>
7. Lippert, T., Ainslie, M.A. and von Estorff, O., 2018. Pile Driving Acoustics Made Simple: Damped Cylindrical Spreading Model. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 143(1), pp. 310–317. <https://doi.org/10.1121/1.5011158>
8. Lisyutin, V.A., 2019. Generalized Rheological Model of the Unconsolidated Marine Sediments with Internal Friction and Effective Compressibility. *Physical Oceanography*, 35(1), pp. 77–91. doi:10.22449/1573-160X-2019-1-77-91

9. Jensen, F.B., Kuperman, W.A., Porter, M.B. and Schmidt, H., 1994. *Computational Ocean Acoustics*. New York: AIP Press, 578 p.

About the authors:

Victor A. Lisyutin, Associate Professor, Sevastopol State University (33 Universitet-skaya St., Sevastopol, Russian Federation), Ph.D. (Phys.-Math.), vlisiutin@mail.ru

Olga R. Lastovenko, Associate Professor, Sevastopol State University (33 Universitet-skaya St., Sevastopol, Russian Federation), Ph.D. (Phys.-Math.).

Aleksandr A. Yaroshenko, Professor, Sevastopol State University (33 Universitet-skaya St., Sevastopol, Russian Federation), Dr.Sci. (Phys.-Math.), yaroshenko_e_a@mail.ru

Contribution of the authors:

Victor A. Lisyutin – general concept, article writing

Olga R. Lastovenko – assistance in calculations

Aleksandr A. Yaroshenko – literature review preparation, article discussion

All the authors have read and approved the final manuscript.