

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИНВЕРСИИ СВОЙСТВ МОРСКИХ ОСАДКОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ АКУСТИЧЕСКОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ

А.Д. Дегтяр, В.А. Лисютин, О.Р. Ластовенко

В 2023 году в Севастопольском госуниверситете начнется эксплуатация малотоннажного научно-исследовательского судна «Пионер-М». Одна из научных программ – изучение дна и донных осадков Черного моря с помощью профилографа. Задачей исследования является разработка адекватного метода восстановления акустических и физических свойств морских осадков по результатам профилирования. Анализируются известные в настоящее время эмпирические и теоретические модели, связывающие нормальный коэффициент отражения и физические свойства морских осадков. Приводятся формулы, реализующие пороакустическое приближение для вычисления коэффициента отражения. Предлагается новая теоретическая модель GSED распространения упругих волн в морских осадках. Модель учитывает два типа потерь: вязкое и внутреннее трение. Показывается хорошее согласие теории GSED с экспериментальными данными. Модель GSED и приближение пороакустики применяются для восстановления некоторых свойств осадков по результатам профилирования дна. Показывается, что неопределенность пористости дает основной вклад в неопределенность восстановления скорости звука в морских осадках. Приводится пример инверсии свойств дна по данным измерений коэффициента отражения, взятым из открытых источников. Для этого используется накопленная авторами база данных свойств осадков.

Ключевые слова: акустика морских осадков, акустическое профилирование, коэффициент отражения, пороакустическое приближение, продольная волна, скорость звука, коэффициент затухания.

Введение

В настоящее время происходит освоение прибрежных территорий России. Севастопольский госуниверситет в 2021 году вошел в состав научно-образовательного центра (НОЦ) «МореАгроБиоТех», одним из направлений развития которого являются морские технологии. В рамках развития НОЦ реализовался проект строительства специализированного НИС «Пионер-М» – малотоннажного судна катamarанного типа, предназначенного в том числе для исследования ресурсов дна мелкого моря. Судно построено, спущено на воду и внутренними водными путями проследовало в Севастополь [1]. Начало научной эксплуатации судна ожидается в 2023 г. Проект программ научных экспедиций включает широкий диапазон исследований – акустика морских осадков, профилирование, картографирование дна, поиск археологических и иных артефактов акустическими методами, апвеллинг, внутренние волны, биоресурсы, экология и др.

Основным дистанционным методом исследования дна является акустическое профилирование. Исследование строения, состава и ресурсов морского дна является нетривиальной задачей, особенно в прибрежных акваториях, где велика антропогенная нагрузка и активна морская флора и фауна. В этих районах морские осадки могут быть насыщены газами и всевозможными примесями разнообразного происхождения [2]. Из-за этого границы промежуточных слоев дна четко не разделяются, и применение стандартных алгоритмов распознавания типов осадков по различию коэффициента отражения может быть некорректно.

Частично преодолеть эти трудности возможно, усложняя методы обработки первичной информации в рамках адекватной теоретической модели распространения упругих волн в морских осадках. Теория должна связывать акустические (скорость и коэффициент затухания продольной и сдвиговой волн) и физические (плотность, пористость, гранулометрию, размер пор, модули межгранулярного трения) свойства осадков [2].

■ Состояние проблемы и постановка задачи

Работ, в которых тем или иным методом интерпретируются результаты профилирования дна очень много. Например, для определения физических параметров осадков авторы работы [3] применяют эмпирические регрессионные уравнения, связывающие коэффициент отражения с пористостью и плотностью, в работе [4] вводится коррекция на возникающую вследствие градиента скорости звука зависимость импеданса от глубины. Метод основан на простой формуле Рэлея, выражающей коэффициент отражения через импеданс границы и регрессионные уравнения, связывающие скорость звука в осадках и плотность осадков с размером гранул и пористостью. Частота 2–10 кГц [3], 150–200 кГц [4]. Метод спектральных отношений – сопоставление спектра сигнала, отраженного от реальных осадков, с накопленными в базе данных спектрами отраженных от калиброванных осадков сигналами используется в работе [5]. Этот метод позволяет восстанавливать частотную зависимость коэффициента затухания. Обобщенная модель отраженного от многослойной среды сигнала предложена в работе [6]. В последнюю модель как составную часть можно встраивать теорию распространения упругих волн в осадках, учитывать процессы рассеяния, направленность излучателя и другие факторы.

Комплексный метод инверсии свойств морских осадков по измеренному нормальному коэффициенту отражения рассмотрен в работах [7–9]. В работах [7, 8] применяется полная теория Био–Столла, в работе [9] – упрощенная модель EDFM (Effective Density Fluid Model).

Приведем основные положения теорий распространения упругих волн в морских осадках, отмечая их применимость для решения задачи сопоставления коэффициента отражения и физических параметров среды.

Наиболее известная – пороупругая теория Био–Столла [10]. Осадки рассматриваются как двухфазная среда, в которой гранулы консолидированы упругим скелетом, а вода может двигаться внутри пространства пор. Затухание объясняется вязкими потерями и внутренним трением. Для учета внутреннего трения к модулю упругости скелета приписывается малая постоянная комплексная добавка. В этом случае на частоте согласования соотношение между реальной и мнимой частями модуля упругости скелета верно, а на высоких частотах нарушено, и вязкие потери оказываются пропорциональны $\omega^{1/2}$, что противоречит экспериментальным данным. Теория Био–Столла

включает 13 входных параметров, для вычисления коэффициента отражения упругих волн от дна используются четыре граничных условия.

Пороакустическая модель EDFM предложена К. Вильямсом [11]. Модель EDFM – предельно упрощенная теория Био–Столла, где упругие модули скелета установлены в ноль и рассматривается только вязкое трение. Отсутствие скелета равнозначно представлению пористой среды как однородной жидкости, в которой может распространяться только «быстрая» продольная волна. Теория EDFM показывает неправильное затухание – на высоких частотах $\alpha \sim \omega^{1/2}$. Для вычисления коэффициента отражения используются простейшие граничные условия соприкосновения жидкость–жидкость. Тем не менее модель показала свою применимость для проведения инверсий в области частот около 3 кГц [9,12,13].

М. Букингом разработаны теории GS (Grain Shearing) [14] и VGS (Viscous Grain Shearing) [15], объясняющие распространение и затухание упругих волн в осадках межгранулярным трением. Трение придает среде продольную и поперечную жесткость, но и приводит к потерям энергии. В теории GS осадки рассматриваются как однофазная среда и вязкие потери не учитываются. Частотная зависимость коэффициента затухания $\alpha \sim \omega^1$, что соответствует экспериментам только на высоких частотах. В VGS теории вязкие потери «симулируются» подобным жидкости реологическим элементом, плотность среды полагается постоянной. Симуляция вязких потерь и предположение о постоянной плотности осадков в принципе не позволяют применять формулу Рэлея для вычисления коэффициента отражения.

В работах [16, 17] представлена теория GSEC (Grain Shearing+Effective Compressibility), основанная на GS теории и новом уравнении состояния среды. Согласно модели GSEC объемный модуль упругости осадков считается комплексным и частотно-зависимым. Подвижность флюида и истечение его из промежутков между гранулами увеличивает сжимаемость среды на низких частотах. С увеличением частоты звука проявляется инерционность флюида, препятствующая его выдавливанию из щелей в более емкую часть порового пространства, что приводит к увеличению упругости среды и скорости звука. Мнимая часть объемного модуля упругости определяет вязкие потери. Модель GSEC поддерживает распространение двух типов продольных волн – быстрой и медленной. Недостаток GSEC модели – ее ориентированность на локальные («сквирт») течения внутри представительного объема среды, вследствие чего предполагается, что количество жидкости внутри

объема и плотность среды не меняются. Последнее предположение затрудняет вычисление коэффициента отражения.

В настоящей статье для вычисления нормального коэффициента отражения в пороакустическом приближении предлагается использовать специально разработанную модель GSEDp (Grain Shearing+Effective Density) распространения упругих волн в морских осадках. Представляемая здесь модель является уточненной версией GSED [18] и предполагает распространение только быстрой компрессионной волны.

■ Модель GSEDp распространения волн деформации в неконсолидированных морских осадках

Модель GSEDp основана на GS теории межгранулярного трения М. Букингема [14] и EDFM модели К. Вильямса [11].

Комплексная фазовая скорость компрессионной волны $\tilde{c}_p = \omega / k_p$ согласно теории GS может быть представлена в виде [14, 16, 17]:

$$\tilde{c}_p = \sqrt{\frac{K_0 + \gamma(i\omega t_0)^n}{\rho_0}}, \tag{1}$$

где $K_0 = \left(\frac{P}{K_f} + \frac{1-P}{K_g} \right)^{-1}$ – равновесный модуль объемной упругости среды, P – пористость, K_f, K_g – модули упругости жидкой и твердой компонент; $\rho_0 = P\rho_f + (1-P)\rho_g$ – равновесная плотность среды, ρ_f, ρ_g – плотность жидкости и твердой компонент; γ – композитный модуль межгранулярного трения, Па; n – показатель деформационного упрочнения (стресс-релаксации) при сжатии, отражающий нелинейность среды, $0 < n < 1$; $t_0 = 1$ с – формальная константа, восстанавливающая правильную физическую размерность, $i = \sqrt{-1}$. Два параметра, γ и n , характеризуют межгранулярное взаимодействие на микроуровне и могут быть определены только путем инверсии экспериментальных данных [16, 17]. Вещественная скорость звука c_p и коэффициент затухания α_p могут быть получены из комплексной скорости как $c_p = \text{Re}(\tilde{c}_p^{-1})^{-1}$, $\alpha_p = -\omega \text{Im}(\tilde{c}_p^{-1})$, Нп/м (α , дБ/м = $8,69 \times \alpha$, Нп/м). Поскольку в сухих средах коэффициент затухания пропорционален первой степени частоты, $\alpha_p = \alpha_{p0} f^\varepsilon$, $\varepsilon = 1$, затухание удобно характеризовать его удельным коэффициентом α_{p0} , дБ/м/кГц.

Дисперсионное уравнение GS теории учитывает только внутреннее трение. Для преобразования однофазного уравнения (1) в квази-двухфазное необходимо подключить эффекты взаимодействия

твердой и жидкой фаз при их относительном движении.

Самый известный способ заключается в замене равновесной плотности в (1) на комплексную эффективную плотность [11, 18].

Уравнение (14) в работе [11] для эффективной плотности в EDFM теории выведено в предположении о глобальном течении Био в пористой среде. Интенсивность глобального течения связана с гидравлической проницаемостью среды. Однако поровое пространство реальной среды имеет структуру сети, состоящую из последовательно и параллельно соединенных участков с различными сечениями. Внутри широких пор между крупными гранулами находятся мелкие частицы, которые сужают или перекрывают проходное сечение. В такой среде возможны как глобальные, так и локальные потоки. Долю объема среды, в которой возможны глобальные потоки, назовем эффективной пористостью ϕ [17]. Поскольку локальные потоки не имеют прямой связи с проницаемостью, она должна быть исключена из уравнения для эффективной плотности с использованием соотношения $\phi = 8T\kappa_0 / a^2$, где κ_0 – статическая проницаемость среды, м²; T – извилистость; a – радиус пор, м (модель пор принимается в виде цилиндрических труб, что отражает структурный коэффициент «8»).

Показано [17], что в морских осадках при деформации сжатия межгранулярное трение вносит малый вклад в результирующую упругость среды, соотношение $K_0 \gg \gamma$ выполняется всегда (исключая газонасыщенные осадки). Пренебрегая внутренним трением, представим среду как суспензию. Рассчитаем эффективную плотность двухфазной среды, полагая в уравнениях движения Био упругость скелета равной нулю.

Действуя совершенно аналогично работе [11], после исключения проницаемости получаем простую и красивую формулу для компрессионной эффективной плотности среды, альтернативную уравнению (14) из работы [11]:

$$\rho_{peff} = \frac{T\rho_f\rho_0 - \phi\rho_f^2 F_s(w)}{T\rho_f + \phi(\rho_0 - 2\rho_f)F_s(w)}, \tag{2}$$

где $F_{s(quirt)}(w) = 1 - \frac{2J_1(i^{3/2}w)}{i^{3/2}wJ_0(i^{3/2}w)}$ – новая функция частотной коррекции, ориентированная на локальные потоки;

$$w = a\sqrt{\omega\rho_f / \eta}, \tag{3}$$

$J_{0,1}$ – функции Бесселя, η – динамическая вязкость жидкости, Па · с. Функция частотной коррекции от-

ражает изменение характера течения в порах с ростом частоты.

Заменяя равновесную плотность в уравнении (1) на эффективную плотность (2), получаем дисперсионное уравнение GSEDr модели для компрессионной волны. Добавочный индекс отражает, что для сдвиговой волны формула для эффективной плотности отличается [18, 19]. Таким образом, модель GSEDr имеет два принципиальных отличия от EDFM модели: первое – учитывает внутреннее трение в неконсолидированной среде; второе – ориентирована не на глобальное течение Био, а на локальные потоки флюида, макропараметр «проницаемость» из формул исключен.

Формула для пороакустического приближения коэффициента отражения при нормальном падении имеет вид:

$$R = \frac{\rho_2 c_p - \rho_f c_f}{\rho_2 c_p + \rho_f c_f}, \quad (4)$$

где c_f – скорость звука в жидкости. Обратим внимание на плотность ρ_2 в уравнении (4). Пороакустическая модель основана на простых акустических граничных условиях контакта двух жидких сред. Однако пористые флюидонасыщенные морские осадки не являются жидкими. В них присутствует внутреннее трение, могут распространяться сдвиговые волны, а содержание жидкости внутри представительного объема меняется. Поэтому величина c_p – это не вещественная, а комплексная скорость звука \tilde{c}_p (1), а ρ_2 – не равновесная плотность двухкомпонентной среды, а эффективная плотность двухфазной среды ρ_{peff} (2). В этом заключается третье принципиальное отличие нашей пороакустической модели от применяемой в работе [12]. Итак: чтобы вычислить коэффициент отражения, в уравнении (4) надо положить $c_p = \tilde{c}_p$ (1), $\rho_2 = \rho_{peff}$ (2).

Донные потери определяются как

$$BL = -20 \log_{10} |R|, \text{ дБ.}$$

■ Сопоставление результатов пороакустического приближения с экспериментальными данными

Входными параметрами, определяющими скорость звука и затухание, являются композитный модуль межгранулярного трения γ и показатель стресс-релаксации n соответственно. Отклонение коэффициента затухания от закона $\alpha_p \sim f^n$ определяется эффективной пористостью ϕ – внутренним параметром модели GSED, связывающим акустические и физические свойства среды.

Трудно найти точное определение для характерного размера пор. Для продольной волны в работе [17] получена оценка: $a = d_e/7,35 = 0,136d_e$, где $d_e = 39\sqrt{\kappa_0}$ – эквивалентный диаметр среды из шариков, имеющей такую же проницаемость, что и реальная среда. Если нет измерений проницаемости, то можно взять оценку $a = d/15 \dots a = d/25$. Этот параметр уточняется по соответствию закона дисперсии и диссипации с экспериментальными измерениями.

Важнейшим параметром инверсии является установка высокочастотных (400 кГц) пределов скорости звука и коэффициента затухания, оказывающих влияние на весь вид дисперсионной кривой. Значение может меняться в пределах 0,2...0,5 дБ/м/кГц в зависимости от типа среды.

Ниже анализируются результаты измерений, имеющие наибольшее практическое значение для акустики мелкого моря. Поскольку скорость звука (упругость среды) и затухание образуют консервативно-диссипативную пару, обязательно измерение обоих параметров.

Результаты были получены в ходе морского эксперимента SAX-99 (Sediment Acoustic eXperiment) [15, 20, 21], Shallow Water 2006 [22]. Скорость и затухание компрессионной волны измерялись в море разными системами на разных частотах. Общие входные параметры: $d = 0,379$ мм – средний диаметр гранул; $\rho_g = 2690$ кг/м³; $K_g = 3,2 \times 10^{10}$ Па; $\rho_f = 1023$ кг/м³; $K_f = 2,395 \times 10^9$ Па; $\eta = 1$ мПа·с; $P = 0,385$; $\kappa_0 = 2,5 \times 10^{-11}$ м²; $c_f = 1530,1$ м/с; $T = 1,35$.

Экспериментальные точки и частотные зависимости скорости звука и коэффициентов затухания в дБ/м/кГц и в дБ/м показаны на рис. 1, а – в. Также показаны результаты альтернативных измерений скорости звука, выполненные другими учеными, но в той же точке SAX-99. Данные взяты из работы [21], обозначено DRDC. Как видно из рис. 1, эти измерения показывают более низкую скорость звука. Затухание в эксперименте DRDC не измерялось.

Результаты инверсии следующие: $a = 24$ мкм; $K_0 = 557 \cdot 10^7$ Па; $\gamma = 5,5 \cdot 10^7$ Па; $n = 0,14$; $\phi = 0,23$. Нижние две кривые (DRDC) на графике скорости звука построены с указанными параметрами межгранулярного трения, только пористость взята большей: $P = 0,41 - 0,42$.

На рис. 1, а – в также показаны кривые дисперсии и затухания согласно теории Био–Столла. Как видно, теория Био–Столла неплохо воспроизводит дисперсионную кривую, но совершенно не соответствует частотной зависимости затухания. Для построения графика скорости звука была взята пористость, равная $P = 0,39$.

Рассмотрим частотные зависимости скорости – рис. 1, а. Скорость звука определяется суммарной упругостью среды (1). Упругость зависит от пористости, внутреннее трение вносит малую добавку. Действительно, согласно результатам инверсии, модуль межгранулярного трения γ составляет $\approx 1\%$ от равновесной упругости среды K_0 . С увеличением частоты инерция жидкости препятствует ее истечению из щелей между гранулами – упругость среды и скорость звука растут. Так проявляется консервативное влияние флюида. На рис. 1, а отмечены

$$c_0 = \sqrt{\frac{K_0}{\rho_0}} \text{ – суспензионная скорость (формула Вуда),}$$

$$c_{p0} = \sqrt{\frac{K_0 + \gamma}{\rho_0}} \text{ – скорость звука на «нулевой» частоте.}$$

Рассмотрим графики на рис. 1, б, в. Обратим внимание, что коэффициент затухания не зависит от пористости (семейство кривых на рис. 1, б) и определяется только модулем межгранулярного трения γ , показателем стресс-релаксации n и эффективной пористостью ϕ . Параметры согласования следующие: 400 кГц, скорость звука 1785 м/с, затухание 0,3-400 дБ/м. На низких и средних частотах (немного ниже переходной $f_r = \frac{\eta}{a^2 \rho_f}$) показатель ε в степен-

ном законе $\alpha_p \sim f^\varepsilon$, $1 < \varepsilon < 2$, внутреннее и вязкое трение сопоставимы. На частоте максимума удельного затухания αp_0 вязкое трение превышает внутреннее, $\varepsilon < 1$. Затем гранулы и заключенный в несквозных порах флюид колеблются вместе, $\varepsilon \rightarrow 1$ снизу, внутреннее трение превышает вязкие потери [17].

На рис. 1, г показана частотная зависимость реальной и мнимой частей эффективной плотности. Реальная часть определяется относительным ускорением и отражает инерционное межфазное взаимодействие, т.е. упругие свойства среды. Изменение реальной части инверсно изменению упругости среды. Разница между равновесной и вещественными частями эффективной плотности и составляет известную из теории Био «присоединенную» массу. Мнимая часть пропорциональна относительной скорости между твердой и жидкой фазами и отражает величину вязких потерь.

Реальная неконсолидированная среда составлена из миллиардов частиц, песчинок разнообразной формы и размеров. Если состояние дна с течением времени не меняется (не влияют штормы, приливы, течения, судоходство), то однотипному дну должны соответствовать осредненные микропараметры трения. Главная неопределенность самой среды, осложняющая проведение инверсий – неопределенность пористости. Кажущаяся изменчивость модуля межгранулярного трения и показателя стресс-релаксации является компенсатором изменчивости скорости звука из-за неопределенности пористости [17].

Примем за основу результаты измерений SAX99 и будем считать здесь эту среду эталонной. Восстановленные по этим входным параметрам величины γ и n будем считать осредненными для дна, показывающего на высоких частотах удельное затухание $(0,3 \pm 0,1)$ дБ/м/кГц и типичную частотную зависимость затухания. Обратим внимание на синие

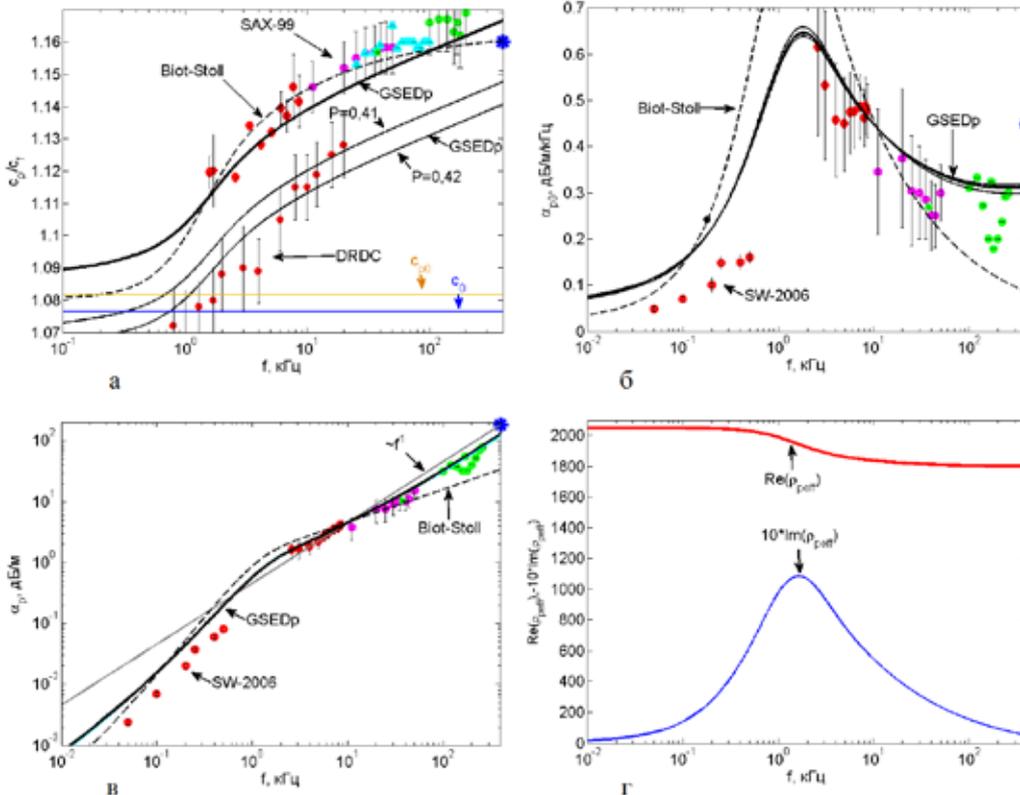


Рис. 1. Частотные зависимости: а – относительной скорости звука; б – приведенного (к частоте 1 кГц) коэффициента затухания; в – коэффициента затухания; г – вещественной и мнимой частей эффективной плотности

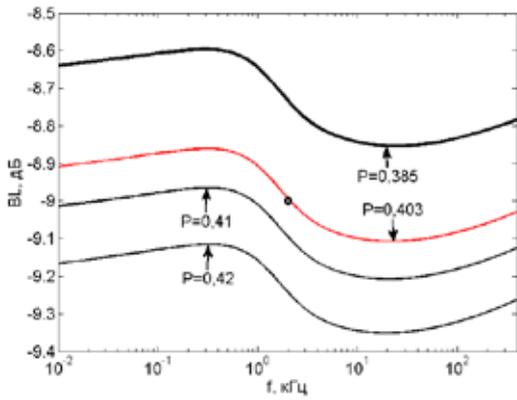


Рис. 2. Частотные зависимости коэффициента отражения (донных потерь)

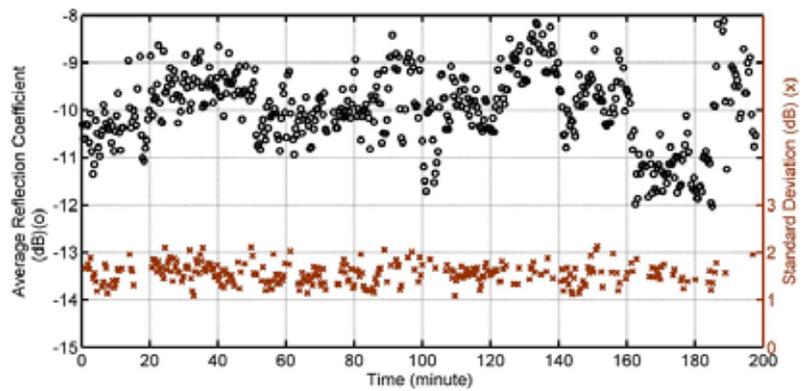


Рис. 3. Результаты измерений коэффициента отражения. Профилограф с ЛЧМ, центральная частота 2,5 кГц. Рисунок взят из работы [9]

звездочки на рис. 1, а – в – результаты измерений, выполненных в лаборатории. При извлечении образцов из среды неизбежно нарушение межгранулярных связей, возможно, поэтому лабораторные измерения показывают большее затухание и меньшую скорость звука.

Восстановим дисперсионную кривую DRDC, не меняя микропараметры трения, а подбирая только пористость. Результат – на рис. 1, а.

Теперь рассмотрим результаты измерений коэффициента отражения. Согласно [7], измеренные в точке SAX-99 потери равны $BL = -9,00 \pm 0,12$, $|R| = 0,355 \pm 0,0052$. Результаты расчета частотной зависимости коэффициента отражения в пороакустическом приближении приведены на рис. 2. Как видно, коэффициент отражения очень чувствителен к значению пористости. Сравнение рис. 1 и рис. 2 показывает, что инверсия скорости звука, проведенная путем измерения коэффициента отражения, дает результат, более близкий к измере-

ниям, помеченным «DRDC». Неопределенность значения пористости одного и того же типа морских осадков, измеренная практически в одной и той же точке, может составлять $\pm 0,2$, что приводит к изменению донных потерь на $\pm 0,5$ дБ [23].

Возьмем теперь результаты измерений коэффициента отражения, приведенные в работе [9], – рис. 3. На рисунке показан осредненный коэффициент отражения в зависимости от времени следования судна вдоль трассы.

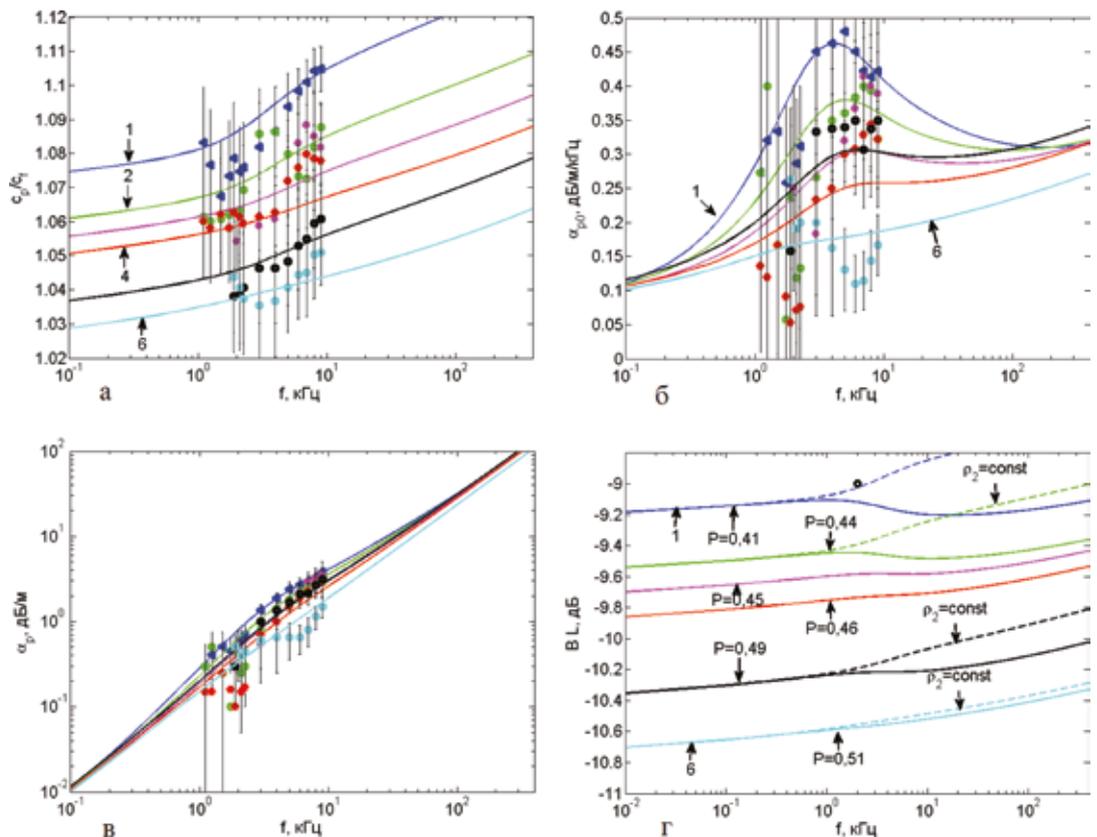


Рис. 4. Частотные зависимости: а – относительной скорости звука; б – приведенного коэффициента затухания; в – донных потерь (коэффициента отражения). Разные типы морского дна, $c_s = 1528$ м/с

Обратим внимание на 120–140 мин. Здесь результаты измерений $BL = -9 \pm 1$ дБ соответствуют работе [7] и рис. 3. Согласно рис. 8 в работе [8] определенный методом спектрального отношения коэффициент затухания составляет $\alpha_{p0} = 0,3 \pm 0,1$ дБ/м/кГц на частоте 2,5 кГц, $c_p = 1750 \pm 50$ м/с, что также соответствует результатам рис. 1, а, б.

Подберем свойства морского дна под измеренные коэффициенты отражения, пользуясь небольшой базой данных, сформированной на основе измерений и описания дна, приведенных в работе [23]. Измерения проводились в 6 точках, где донные осадки варьируются от крупнозернистого песка до обломочного мусора. Графики скорости звука, затухания и коэффициента отражения, построенные по экспериментальным данным [23] с помощью теории GSED и пороакустического приближения, показаны на рис. 4.

Отметим, что измерения скорости звука и коэффициента затухания, приведенные в работе [23], производились датчиками, заглубляемыми внутрь толщи осадков на глубину до 2 м.

Описание свойств дна и его физические характеристики приведены в таблице.

Рассмотрим результаты профилирования. Интервал 120–140 мин измерений по рис. 3. Здесь коэффициент отражения колеблется от $-8,2$ до $-9,5$ дБ. Величины меньше 9 дБ соответствуют среднезернистому хорошо уплотненному песку типа SAX99 с пористостью меньше 0,4 – рис. 2. Потери 9,2 дБ соответствуют кривой 1 на рис. 4 и точке «Transition 1» (названия точек – согласно [23]) – крупнозернистый песок в смеси с гравием и осколками раковин. Дисперсионная кривая с явным изгибом и нелинейная частотная зависимость затухания отражают существенные вязкие потери.

Пунктиром на рис. 4, з отмечена частотная зависимость коэффициента отражения, если положить плотность дна в (4) равной равновесной. В этом случае форма $BL(f)$ практически повторяет форму дисперсионной кривой $c(f)$.

Точка WARBAL «2» – постепенное возрастание пористости, тонкослоистое дно, вязкие потери снижаются. Точки MORAY и VLA2, «3» и «4», показыва-

ют близкие, однако вполне различимые акустические свойства. По рис. 3 такое дно, скорее, соответствует 110–120 с наблюдений.

Локальную изменчивость свойств и структуры дна выявляют измерения в точках VLA1s и VLA1m, расстояние между которыми всего 20 м. Наличие ила, покрывающего песок, значительно изменяет акустические свойства дна. В илистом дне практически отсутствуют вязкие потери, эффективная пористость минимальна, дисперсия скорости звука соответствует только внутреннему трению, коэффициент затухания пропорционален частоте. Величина потерь BL здесь приближается к 12 дБ, что согласно рис. 3 соответствует интервалу около 60 мин наблюдений.

Заключение

Важнейшей обобщенной макрохарактеристикой морских осадков является пористость. Пористость устойчиво и надежно коррелирует с коэффициентом отражения и скоростью звука. Рассмотренные здесь результаты измерений коэффициента отражения выполнены в окрестности частоты 2 кГц. Восстановленные методом спектрального отношения значения затухания меняются от 0,25 дБ/м/кГц до 0,6 дБ/м/кГц [9], что соответствует рис. 1, б и рис. 4, б. Если принять глубину проникновения звука в осадки порядка длины волны, то значение 0,6 дБ/м/кГц можно считать характерным для слабоуплотненных осадков, близких к границе раздела. В более глубоких слоях затухание может быть ниже на 0,1...0,2 дБ/м/кГц. Знание скорости звука и затухания даже на одной частоте (в ограниченном диапазоне) вместе с базой данных акустических характеристик морских осадков уже позволяет прогнозировать весь вид дисперсионно-диссипативной кривой. Через посредство теории GSED возможно затем восстановить и физические свойства осадков.

Необходимым условием определения коэффициента отражения является правильная калибровка профилографа, для чего могут быть подготовлены специальные полигоны с осадками, акустические свойства которых известны.

Свойства дна и восстановленные физические характеристики

№	Точка	Свойства дна	d , мм	P	ϕ	a , мкм
1	Trans.1	грубый песок, осколки раковин, гравий	0,4	0,41	0,11	16
2	WARB.	песок, сверху грубый, снизу мелкий, слоистое дно	0,4	0,44	0,08	14,8
3	MORAY	песок мелкий	0,2	0,45	0,05	13,3
4	VLA2	песок мелкий	0,2	0,46	0,03	13,3
5	VLA1sand	мусор, гравий, осколки раковин поверх песка	0,2	0,49	0,05	14,3
6	VLA1mud	мусор, ил на песке	0,2	0,51	0,01	-

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_planiuyut_uchastie_v_ekspeditsiyakh_na_pioner_m/ (дата обращения: 23.08.2022).
2. Jackson D.R., Richardson M.D. High-Frequency Seafloor Acoustics. New York: Springer, 2007.
3. LeBlanc L.R., Mayer L., Rufino M., Schok S.G., King J. Marine sediment classification using the chirp sonar // J. Acoust. Soc. Am. 1992. Vol. 91, No. 1. P. 107–115.
4. Walree P.A., Ainslie M.A., Simons D.G. Mean grain size mapping with single-beam echo sounders // J. Acoust. Soc. Am. 2006. Vol. 120, No. 5. P. 2555–2566.
5. Tseng Y-T., Ding J-J., Liu C-S. Analysis of Attenuation Measurements in Ocean Sediments Using Normal Incidence Chirp Sonar // IEEE J. of Ocean. Eng. 2012. Vol. 37, No. 3. P. 533–543.
6. Rakotonarivo S., Legris M., Desmare R., Sessarego J-P., Bourillet J-F. Forward modelling sediment characterization using chirp sonars // Geophysics. 2011. Vol. 76, No. 4. P. T91–T99.
7. Schock S.G. A Method for estimating the physical and acoustic properties of the sea bed using chirp sonar data // IEEE J. of Ocean. Eng. 2004. Vol. 29, No. 4. P. 1200–1217.
8. Schock S.G. Remote estimates of physical and acoustic sediment properties in the South China Sea using chirp sonar data and the Biot model // IEEE J. of Ocean. Eng. 2004. Vol. 29, No. 4. P. 1218–1230.
9. Chiu L Y C, Chang A, Lin Y-T and Liu C-S Estimating Geoacoustic Properties of Surficial Sediments in the North Mien-Hua Canyon Region With a Chirp Sonar Profiler // IEEE J. of Ocean. Eng. 2015. Vol. 40, No. 1. P. 222–236.
10. Stoll R. D. Sediment Acoustics. New York : Springer, 1989. 153 p.
11. Williams K.L. An effective density fluid model for acoustic propagation in sediments derived from Biot theory // J. Acoust. Soc. Am. 2001. Vol. 110, No. 5. P. 2276–2281.
12. Bonomo A.L., Chotiros N.P., Isakson M.J. On the validity of the effective density fluid model as an approximation of a poroelastic sediment layer // J. Acoust. Soc. Am. 2015. Vol. 138, No. 2. P. 748–757.
13. Camin H.J., Isakson M.J. A comparison of sediment reflection coefficient measurements to elastic and poro-elastic models // J. Acoust. Soc. Am. 2006. Vol. 120, No. 5. P. 2437–2449.
14. Buckingham M.J. Wave propagation, stress relaxation, and grain-to-grain shearing in saturated, unconsolidated marine sediments // J. Acoust. Soc. Am. 2000. Vol. 108, No. 6. P. 2796–2815.
15. Buckingham M.J. On pore-fluid viscosity and the wave properties of saturated granular materials including marine sediments // J. Acoust. Soc. Am. 2007. Vol. 122, No. 3. P. 1486–1501.
16. Лисютин В. А. Обобщенная реологическая модель неконсолидированных морских осадков с внутренним трением и эффективной сжимаемостью // Морской гидрофиз. журн. 2019. Т. 35, № 1. С. 85–100.
17. 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.
18. Лисютин В.А. Простая акустическая модель неконсолидированных морских осадков с внутренним и вязким трением // Экол. вестн. науч. центров ЧЭС. 2018. Т. 15, № 3. С. 39–51.
19. Лисютин В.А., Ластовенко О.Р. Оценка степени взаимодействия твердой и жидкой фаз в неконсолидированных водонасыщенных песчаных морских осадках при распространении сдвиговой волны // Морской гидрофиз. журн. 2021. Т. 37, № 1. С. 98–112.
20. Williams K. L., Darrell R. J., Thorsos E. I. et. al. Comparison of Sound Speed and Attenuation Measured in a Sandy Sediment to Predictions Based on the Biot Theory of Porous Media // IEEE J. of Ocean. Eng. 2002. Vol. 27, No. 3. P. 413–428.
21. Hines P. C., Osler J. C., Scrutton J. G. E., Halloran L. J. S. Time-of-Flight Measurements of Acoustic Wave Speed in a Sandy Sediment at 0.6–20 kHz // IEEE J. of Ocean. Eng. 2010. Vol. 35, No. 3. P. 502–515.
22. Wan L., Badiy M., Knobles D.P. Geoacoustic inversion using low frequency broadband measurements from L-shaped arrays in the Shallow Water 2006 Experiment // J. Acoust. Soc. Am. 2016. Vol. 140, No. 4. P. 2358–2373.
23. Yang J., Tang D. Direct Measurement of Sediment Sound Speed and Attenuation in the Frequency Band of 2–8 kHz at the Target and Reverberation Experiment Site // IEEE J. of Ocean. Eng. 2017. Vol. 42, No. 4. P. 1102–1109.

Сведения об авторах

ДЕГТЯР Алексей Дмитриевич, старший преподаватель кафедры физики

Севастопольский государственный университет

Адрес: 299053, г. Севастополь, Университетская, 33

Область научных интересов: акустика морских осадков, акустика мелкого моря

Тел.: +7(978) 857-88-56, +7(978)7622724

E-mail: lyohadegytyar@mail.ru

ЛАСТОВЕНКО Ольга Ростиславовна, канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент кафедры высшей математики

Севастопольский государственный университет

Адрес: 299053, г. Севастополь, Университетская, 33

Область научных интересов: акустика морских осадков, акустика мелкого моря

Тел.: +7(978) 762-27-24

E-mail: vlisiutin@mail.ru

ЛИСЮТИН Виктор Александрович, кандидат физ.-мат. наук, доцент, доцент кафедры физики

Севастопольский государственный университет

Адрес: 299053, г. Севастополь, Университетская, 33

Область научных интересов: акустика морских осадков, акустика мелкого моря

Тел.: +7(978) 762-27-24

E-mail: vlisiutin@mail.ru.

ORCID: 0000-0003-3363-888X



EVALUATION OF THE POSSIBILITIES OF INVERSION OF MARINE SEDIMENT PROPERTIES FROM THE RESULTS OF ACOUSTIC PROFILING

A.D. Degtyar, V.A. Lisyutin, O.R. Lastovenko

In 2023, Sevastopol State University will start operating the small-tonnage research vessel "Pioner-M". One of the scientific programs is the study of the seabed and bottom sediments of the Black Sea using a profiler. The objective of the study is to develop an adequate method for inverting the acoustic and physical properties of marine sediments based on the results of profiling. Currently known empirical and theoretical models are analyzed that relate the normal reflection coefficient and the physical properties of marine sediments. Formulas are given that implement the pore-acoustic approximation for calculating the reflection coefficient. A new theoretical GSED model of elastic wave propagation in marine sediments is proposed. The model takes into account two types of losses: viscous and internal friction. Good agreement between the GSED theory and experimental data is shown. The GSED model and pore-acoustic approximation are used to invert some sediment properties from bottom profiling results. It is shown that the porosity uncertainty is the main contributor to the uncertainty of sound velocity recovery in marine sediments. An example of the inversion of the bottom properties according to the measurement data of the reflection coefficient taken from open sources is given. For this, a database of precipitation properties accumulated by the authors is used.

Keywords: acoustics of marine sediments, acoustic profiling, reflection coefficient, pore-acoustic approximation, compressional wave, speed of sound, attenuation coefficient

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. Jackson D.R., Richardson M.D. High-Frequency Seafloor Acoustics. New York: Springer, 2007.
3. LeBlanc L.R., Mayer L., Ruffino M., Schok S.G., King J. J. Acoust. Soc. Am. 1992. Vol. 91. No. 1. P. 107–115.
4. Walree P.A., Ainslie M.A., Simons D.G. J. Acoust. Soc. Am. 2006. Vol. 120. No. 5. P. 2555–2566.
5. Tseng Y-T., Ding J-J., Liu C-S. IEEE J. Ocean. Eng. 2012. Vol. 37. No. 3. P. 533–543.
6. Rakotonarivo S., Legris M., Desmare R., Sessarego J-P., Bourillet J-F. Geophysics. 2011. Vol. 76. No. 4. P. T91–T99.
7. Schock S.G. IEEE J. of Ocean. Eng. 2004. Vol. 29. No. 4. P. 1200–1217.
8. Schock S.G. IEEE J. of Ocean. Eng. 2004. Vol. 29. No. 4. P. 1218–1230.
9. Chiu L Y C., Chang A., Lin Y-T and Liu C-S IEEE J. Ocean. Eng. 2015. Vol. 40. No. 1. P. 222–236.
10. Stoll R. D. Sediment Acoustics. New York : Springer, 1989. 153 p.
11. Williams K.L. J. Acoust. Soc. Am. 2001. Vol. 110. No. 5. P. 2276–2281.
12. Bonomo A.L., Chotiros N.P., Isakson M.J. J. Acoust. Soc. Am. 2015. Vol. 138. No. 2. P. 748–757.
13. Camin H.J., Isakson M.J. J. Acoust. Soc. Am. 2006. Vol. 120. No. 5. P. 2437–2449.
14. Buckingham M.J. J. Acoust. Soc. Am. 2000. Vol. 108. No. 6. P. 2796–2815.
15. Buckingham M.J. J. Acoust. Soc. Am. 2007. Vol. 122. No. 3. P. 1486–1501.
16. Lisyutin, V.A. Physical Oceanography, [e-journal]. 2019. Vol. 26. No. 1, pp. 77–91.
17. Lisyutin V.A., Lastovenko O.R. Acoustical Physics 2020. Vol. 66. No. 4. P. 401–415.
18. Lisyutin V.A. Prostaya akusticheskaya model nekonsolidirovannykh morskikh osadkov s vnutrennim i vyazkim treniyem [A simple acoustic model of unconsolidated marine sediments with internal and viscous friction]. Ekologicheskij vestnik nauchnykh tsentrov CHES. 2018. Vol. 15. No. 3. P. 39–51.
19. Lisyutin, V.A. and Lastovenko, O.R. Physical Oceanography, [e-journal]. 2021. 28 (1), P. 90-103. doi:10.22449/1573-160X-2021-1-90-103.
20. Williams K. L., Darrell R. J., Thorsos E. I. et. al. IEEE J. Ocean. Eng. 2002. Vol. 27. No. 3. P. 413–428.
21. Hines P. C., Osler J. C., Scrutton J. G. E., Halloran L. J. S. IEEE J. Ocean. Eng. 2010. Vol. 35. No. 3. P. 502–515.
22. Wan, L., Badiy M., Knobles D.P. J. Acoust. Soc. Am. 2016. Vol. 140. No. 4. P. 2358–2373.
23. Yang J., Tang D. IEEE J. of Ocean. Eng. 2017. Vol. 42. No. 4. P. 1102–1109.

About authors

DEGTYAR Alexey Dmitrievich, Senior Lecturer, Department of Physics

Sevastopol State University

Address: 299053, Sevastopol, Universitetskaya, 33

Research interests: marine sediment acoustics, shallow sea acoustics

Phone: +7(978) 857-88-56, +7(978)7622724

E-mail: lyohadegtyar@mail.ru

LISYUTIN Viktor Aleksandrovich, Candidate of Phys.-Math. Sciences, Associate Professor

Sevastopol State University

Address: 299053, Sevastopol, Universitetskaya, 33

Research interests: marine sediment acoustics, shallow sea acoustics

Phone: +7(978) 762-27-24

E-mail: vlisiutin@mail.ru

ORCID: 0000-0003-3363-888X

LASTOVENKO Olga Rostislavovna, Ph.D. Phys.-Math. Sciences, Associate Professor

Sevastopol State University

Address: 299053, Sevastopol, Universitetskaya, 33

Research interests: marine sediment acoustics, shallow sea acoustics

Phone: +7(978) 762-27-24

E-mail: vlisiutin@mail.ru



Recommended citation:

Degtyar A.D., Lisyutin V.A., Lastovenko O.R. EVALUATION OF THE POSSIBILITIES OF INVERSION OF MARINE SEDIMENT PROPERTIES FROM THE RESULTS OF ACOUSTIC PROFILING. Underwater investigations and robotics. 2023. No. 1 (43). P. 50–59. DOI: 10.37102/1992-4429_2023_43_01_05. EDN: QPPRSA.