

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДА КОГЕРЕНТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ МАЛОКОНТРАСТНЫХ ДОННЫХ СЛОЕВ В ЛАБОРАТОРНОМ БАССЕЙНЕ

© 2024 г. В. И. Калинина^{a,b,*}, П. Н. Вьюгин^b, И. А. Капустин^{a,b}

^aИнститут прикладной физики РАН, ул. Ульянова 46, Нижний Новгород, 603950 Россия

^bНижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
пр. Гагарина 23, Нижний Новгород, 603022 Россия

*e-mail: v.kalinina@ipfran.ru

Поступила в редакцию 11.01.2024 г.

После доработки 20.02.2024 г.

Принята к публикации 19.06.2024 г.

В лабораторных условиях проведена экспериментальная верификация разработанных алгоритмов реконструкции малоконтрастных донных слоев при их когерентном зондировании. В алгоритмах используются параметрические модели формирования сигналов, отраженных от слоистого полупространства в виде набора упругих слоев. Для решения поставленной задачи на кафедре акустики ННГУ им. Н. И. Лобачевского была создана экспериментальная установка для формирования, излучения и приема звуковых импульсов с высокой разрешающей способностью, отраженных от набора упругих слоев, помещенных в бассейн с водой. Проведенное экспериментальное исследование показало возможность применения метода когерентного зондирования для слоистых сред, имеющих относительно близкие по величине акустические параметры. В результате обработки данных, полученных при проведении эксперимента в лабораторном бассейне, было показано хорошее соответствие разработанной расчетной модели отражения зондирующих акустических импульсных сигналов от слоистого дна и данных физического моделирования. Показано, что на основании анализа плоскости геоакустических параметров конкретной задачи с использованием разработанной численной модели могут быть оценены возможности перспективного метода когерентной диагностики малоконтрастных донных слоев.

Ключевые слова: лабораторный эксперимент, сейсмоакустическое зондирование, морское дно, малоконтрастные слои

DOI: 10.31857/S0320791924040081 EDN: XFKBIX

1. ВВЕДЕНИЕ

Развитие адаптивных методов акустической диагностики морского дна с целью восстановления как структуры донных слоев, так и их физических параметров является важной прикладной задачей. Актуальными являются практические задачи обнаружения малоконтрастных донных слоев, таких, например, как слои газогидратов, а так же определение границ слоев малой толщины в шельфовых зонах и окраинных морях РФ, включая моря Арктического бассейна [1]. Диагностика тонких донных структур важна при поиске полезных ископаемых в пределах Арктического шельфа, при проведении морских инженерных работ, а также при создании систем зонального подводного наблюдения вблизи портовых зон и морских сооружений.

Использование мощных сейсмоакустических (СА) источников с целью повышения разрешающей способности локализации в таких областях ограничивается экологическими требованиями или глубиной водной толщи на мелководье. Идея использования относительно маломощных когерентных акустических источников уже получила свое теоретическое обоснование и подтверждение эффективности ее практического применения (см., например, [2–5] и цитируемую там литературу).

Известно, что применение когерентных методов при решении задач акустической диагностики неоднородных сред потенциально обладает рядом важных преимуществ. Наибольший интерес для практического использования представляют в рамках такого подхода широкополосные

сложномодулированные сигналы с большой базой (произведением частотной полосы сигнала на его длительность), у которых характерная ширина функции автокорреляции (например, ЛЧМ-сигнала) значительно меньше длительности самого сигнального импульса [6]. В этом случае при их согласованной фильтрации практически вся мощность сигнала фокусируется в узком пике корреляционной функции, а сам этот пик физически эквивалентен (в смысле пространственного разрешения) одиночному короткому видеоимпульсу значительно большей мощности. Взаимная когерентность таких сигналов увеличивает помехоустойчивость зондирования дна путем накопления последовательности принимаемых сигналов в пределах пространственно-временного интервала их взаимной когерентности. Величина этого интервала имеет ограничения в нестационарных условиях, что указывает на необходимость разработки и применения дополнительных адаптивных алгоритмов обработки принимаемых сигналов.

Практически важным направлением исследований также является разработка физических и численных моделей распространения когерентных, сложных, направленных в пространстве акустических импульсных сигналов, формируемых не только одиночным источником, но и протяженными решетками излучателей при мультистатической схеме наблюдения. Такой подход обеспечивает значительное повышение разрешающей способности при наблюдении малоконтрастных донных слоев. Целью настоящей работы является экспериментальное исследование возможностей выделения относительно тонких слоев и слоев, имеющих слабый контраст по различию геоакустических параметров, таких как плотность пород и скорости распространения в них продольных и поперечных волн, при использовании когерентных широкополосных импульсных сигналов.

МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Для развития адаптивных методов дистанционной акустической диагностики донных структур, необходимо разработать численную модель формирования и приема направленных зондирующих акустических импульсных сигналов.

Рассмотрим в качестве излучающего (ИА) и приемного (ПА) антенных устройств, соответственно, горизонтально и вертикально ориентированные в пространстве эквидистантные линейные

антенные решетки из M_S независимых излучателей и M_R гидрофонов (см. рис. 1). Координаты отдельных элементов антенн обозначим $\{\mathbf{r}_i^{(S)}\}_{i=1}^{M_S}$ — для решетки излучателей и $\{\mathbf{r}_j^{(R)}\}_{j=1}^{M_R}$ — для приемной решетки.

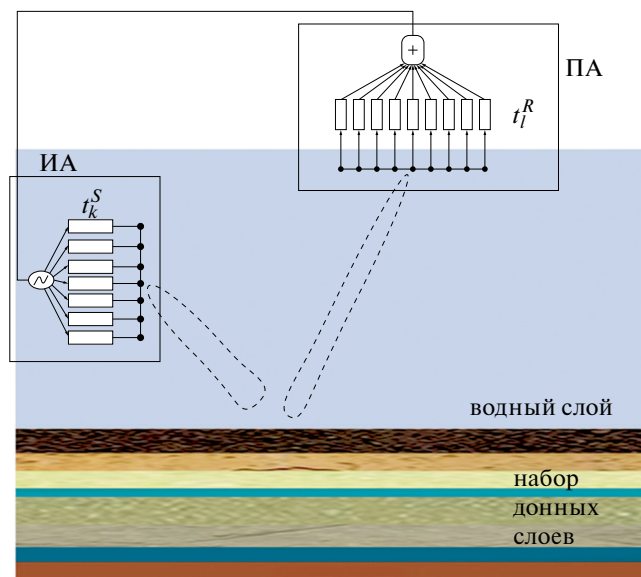


Рис. 1. Функциональная схема акустического комплекса для диагностики донных структур.

Излученные акустическими источниками $\mathbf{r}_i^{(S)}$ когерентные импульсные сигналы отражаются от границ донных слоев, принимаются гидрофонами $\mathbf{r}_j^{(R)}$ приемной антенной системы и подвергаются обработке с целью идентификации границ донных слоев. Чтобы антенные решетки были сфокусированными в область наблюдения, задержки на излучение сигналов отдельными элементами ИА выбираются такими, чтобы обеспечить одновременный приход сигналов в зондируемую область наблюдения; аналогично выбираются задержки в линиях усиления сигналов, принимаемых отдельными гидрофонами.

В качестве первого приближения модели формирования отраженных от донных слоев когерентных акустических сигналов при пространственной фильтрации вертикальными приемно-излучающими решетками, обобщим разработанную ранее модель отражения акустического сигнала от слоистого дна, в которой излучателем служил одиночный ненаправленный когерентный источник, а приемником — ненаправленный гидрофон [7].

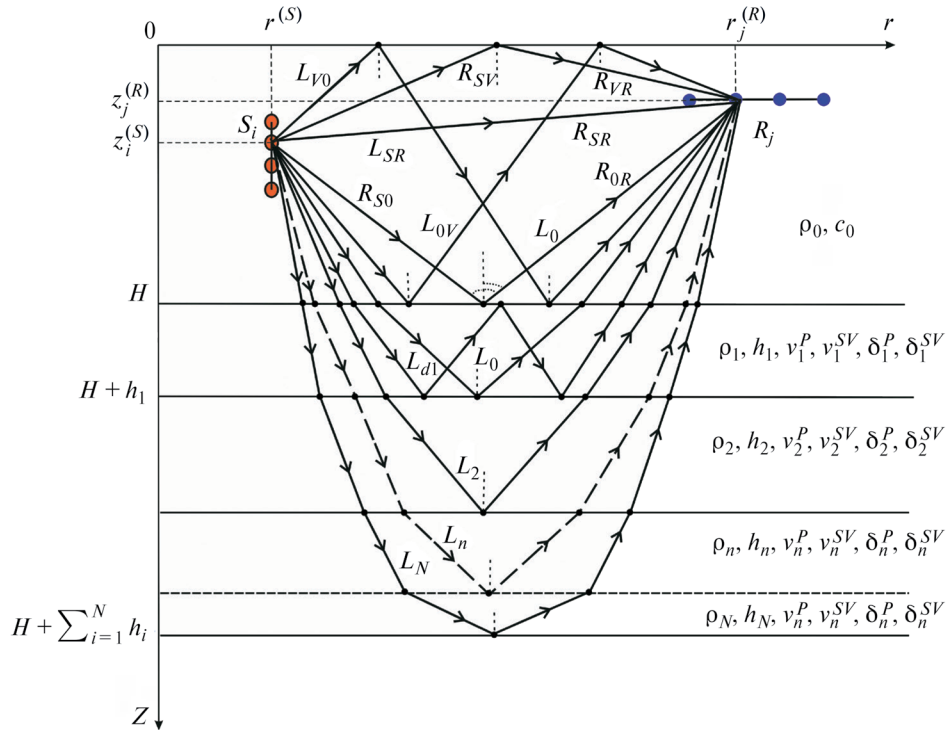


Рис. 2. Структурная схема отражений импульсов от донных слоев с использованием направленных излучающей и приемной решеток.

Структурная схема отражений в таком приближении представлена на рис. 2.

В разрабатываемой модели дно состоит из N упругих слоев. Ширина i -го слоя равна h_i . Плотность воды ρ_0 , плотность грунта в n -ом слое — ρ_n , скорость распространения звука в воде — c_0 , скорости продольных и поперечных волн в n -ом ($i = n$) слое — v_n^P и v_n^{SV} , декременты затухания — δ_n^P и δ_n^{SV} . Точки приема отдельных гидрофонов R_j расположены внутри волновода толщиной H на глубине $z_j^{(R)}$ и на расстояниях $\mathbf{r}_{S_i R_j}$ от отдельного источника S_i , излучающего импульсный сигнал мощностью W . Спектральная амплитуда полного импульса от отдельного источника S_i в точке приема отдельного гидрофона R_j в данной модели представляется как сумма следующих волн: прямой волны $L_{S_i R_j}$; волны, отраженной от свободной поверхности воды $L_{S_i V R_j}$; волн, двукратно отраженных в водной толще $L_{S_i 0 V R_j}$ и $L_{S_i V 0 R_j}$; волны, отраженной от верхней границы 1 слоя $L_{S_i 0 R_j}$; волны, двукратно отраженной в 1 слое $L_{S_i d 1 R_j}$; и суммы волн, отраженных от нижних границ донных слоев $\hat{L}_{S_i N R_j}$. Модель учитывает наличие упругих донных слоев и образование на каждой границе, разделяющей два слоя, отраженных и преломленных продольных и поперечных волн.

Коэффициенты отражения V и преломления W для продольного и поперечного типов волн определяются формулами Цеппритца [8]. Спектральная амплитуда полного импульса, отраженного от всех нижних границ донных слоев, в точке приема $\hat{L}_{S_i N R_j}$ представляется суммой волн, отраженных от нижних границ донных слоев:

$$\hat{g}_{S_i R_j}(\omega) = \sum_{n=1}^N \hat{g}_n(\omega), \quad (1)$$

где $\hat{g}_n(\omega)$ — сумма волн, отраженных от нижней границы n -го слоя, где $n = 1, \dots, N$:

$$\hat{g}_n(\omega) = \sum_{k=0}^{2^n-1} \hat{g}_n^{(k)}(\omega). \quad (2)$$

Набор волн $(2^n - 1)$ определяется составом дна, т.е. наличием жидких и упругих слоев [7], и каждая волна (k) включает в себя поперечные и продольные компоненты, образующиеся на каждой конкретной границе.

В рамках используемого геометро-акустического приближения получаем:

$$\hat{g}_n^{(k)}(\omega) = A_n^{(k)} g_{S_i}^{(k)}(\omega) e^{-i\omega \tau_n^{(k)}}, \quad (3)$$

$$A_n^{(k)} = \frac{1}{R_{S_i R_j}^{(k)}} \prod_{m=0}^{n-1} W_{m,m+1}^{(s_m s_{m+1})} \left(\theta_{mn}^{(s_m)} \right) V_n^{(s_n z_n)} \left(\theta_{nn}^{(s_n)} \right) \prod_{m=n}^1 W_{m,m-1}^{(z_m z_{m-1})} \left(\theta_{mn}^{(z_m)} \right) e^{-\Delta_n^{(k)}(\omega_0)}, \quad (4)$$

где $R_{S_i R_j}^{(k)}$ — полное расстояние, которое проходит волна, $\tau_n^{(k)}$ — время распространения волны от источника S_i к приемнику R_j , $\Delta_n^{(k)}(\omega_0)$ — декремент затухания на центральной частоте импульса. Суммарная спектральная амплитуда принимаемого импульса $\hat{L}_{S_i R_j}$ определяется следующим образом:

$$\hat{g}_{S_i R_j}(\omega) = \sum_{n=1}^N \sum_{k=0}^{2^n-1} \hat{g}_n^{(k)}(\omega) = \sum_{n=1}^N \sum_{k=0}^{2^n-1} A_n^{(k)} \hat{g}_S(\omega) e^{-i\omega \tau_n^{(k)}}. \quad (5)$$

Разработанная модель является важным инструментом как для интерпретации полученных в натурных экспериментах по когерентному акустическому зондированию слоистого дна данных, так и предварительного прогнозирования картины отражений в экспериментах, где прием сигнала происходит на фоне шумов или не все параметры волновода возможно контролировать. Основой для развитой в настоящем исследовании модели послужила модель, описанная авторами ранее в работе [7]. В настоящем исследовании модель была дополнена двукратными отражениями сигналов в волноводе и в первом донном слое. Использование разрабатываемой модели стало весьма целесообразным в рамках проблемы определения местоположения границ донного слоя в составе набора малоконтрастных слоев, численного моделирования и описания результатов лабораторных экспериментов, описанных ниже.

ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

На базе лабораторной установки кафедры акустики радиофизического факультета ННГУ им. Лобачевского был собран комплекс масштабного физического моделирования для апробации метода когерентного зондирования дна при локации акустически-слабых неоднородностей в слоистых средах. Характеристики комплекса рассчитывались с помощью разработанных программных реализаций численных моделей, основанных на теории распространения и рассеяния акустических сигналов в океанических волноводах [9, 10].

Решаемой при помощи комплекса физического моделирования задачей является исследование возможностей обнаружения малоконтрастных донных слоев на примере набора пластин плексигласа,

а также оценки минимально возможной для реконструкции толщины малоконтрастного водного слоя, расположенного между слоями плексигласа (см. рис. 3). Измерительный комплекс (см. рис. 3) состоял из следующих элементов: 1 — ЦАП в составе измерительной системы National Instruments, 2 — усилитель мощности У7–5, 3 — излучатель, 4 — изолирующая пластина пенопласта, 5 — две пластины из плексигласа, расположенные горизонтально, 6 — гидрофон, закрепленный на координатном устройстве, 7 — входной усилитель сигнала гидрофона В&К, 8 — фильтр полосовой, 9 — контрольный осциллограф, 10 — АЦП в составе измерительной системы National Instruments с записью принятого сигнала длительностью 1000 мкс, 11 — измерительная система National Instruments с генератором сигналов и записью данных (частота дискретизации сигналов составляла 2 МГц), 12 — ванна из нержавеющей стали с размерами 295×82×70 см, 13 — распорки между пластинами плексигласа. На рис. 3 так же указана система координат (x, y, z) , используемая в координатном устройстве, жестко связанном с ванной 12 и перемещающим гидрофон. Пластины плексигласа располагались на вертикальных подставках (размеры подставок 250×120×65 мм), поставленных на дно ванны для увеличения пути прохождения сигнала через водный слой между нижней границей нижнего плексигласа и дном железной ванны, и ослабления отраженного от дна ванны сигнала. Полосовой фильтр обеспечивал фильтрацию принимаемого сигнала в полосе от 60 до 300 кГц, подавляя частоты сигнала вне этого диапазона. Физические размеры корпуса излучателя составляли 20×60×20 мм.

Малоконтрастные донные слои моделировались при помощи двух одинаковых пластин плексигласа (размерами 160×50×3.5 см) и водного слоя между ними, получаемого с использованием четырех одинаковых по толщине распорок (элементы 13 на рис. 3), располагающихся между пластин по углам. Акустические параметры пластин плексигласа были использованы следующие: плотность 1190 кг/м³, скорость продольных волн 2680 м/с, скорость поперечных волн 1121 м/с и затухание 0.1 дБ/м. Скорость звука в воде $c_0 = 1475$ м/с, плотность воды $\rho_0 = 1000$ кг/м³. Стенки и дно бассейна изготовлены из листовой нержавеющей стали.

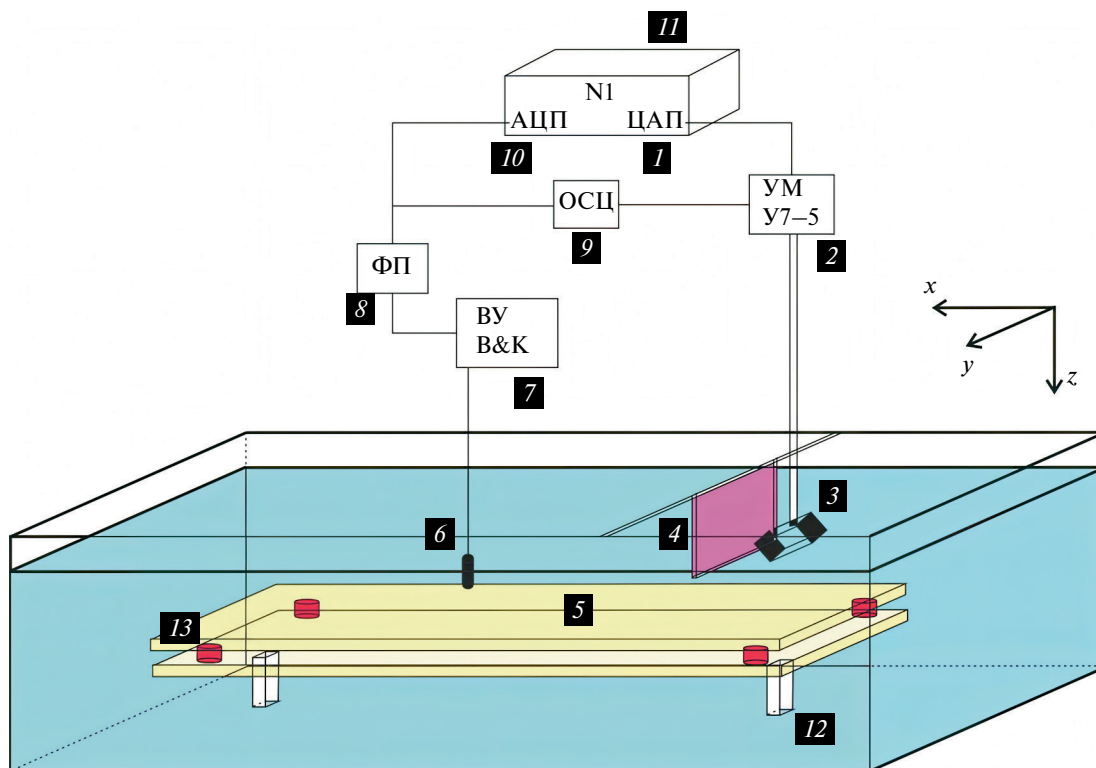


Рис. 3. Блок-схема комплекса лабораторных измерений.

Для дна были приняты следующие параметры: плотность $\rho_N = 7959 \text{ кг/м}^3$, скорость продольных волн $v_N^P = 5950 \text{ м/с}$, скорость поперечных волн $v_N^{SV} = 3240 \text{ м/с}$.

Размеры контактных поверхностей распорок составляли $2 \times 2 \text{ см}$, а высота распорок менялась в зависимости от номера измерений от 4 до 32 мм (см. табл.). Источник акустических сигналов и приемная система располагались на различных глубинах от 5 до 25 см. Расстояния между ними менялись с помощью координатного устройства, оснащенного системой позиционирования с лазерным дальномером, имеющим точность 0.1 мм. На рис. 4 представлены графики параметров модели слоистого дна, используемой при моделировании: по оси z осуществлялся отсчет глубины со значением $z = 0$ на границе вода–воздух, линия 1 соответствует изменению поперечной скорости в слоях (м/с), линия 2 соответствует изменению плотности в слоях (кг/м^3), линия 3 — изменению продольной скорости в слоях (м/с). Пунктирными линиями на рис. 4 обозначены границы пластин плексигласа.

При помощи наборов распорок различной высоты регулировалась толщина водного слоя h_2 между пластинами плексигласа. Экспериментальная лабораторная установка позволяла

контролировать геометрические, акустические и прочие параметры, необходимые для получения результатов. Тракт излучения формировал когерентные акустические ЛЧМ импульсы в полосе частот от 70 до 300 кГц, длительностью 100 мкс с огибающей Блэкмана–Харриса [11], которые излучались в

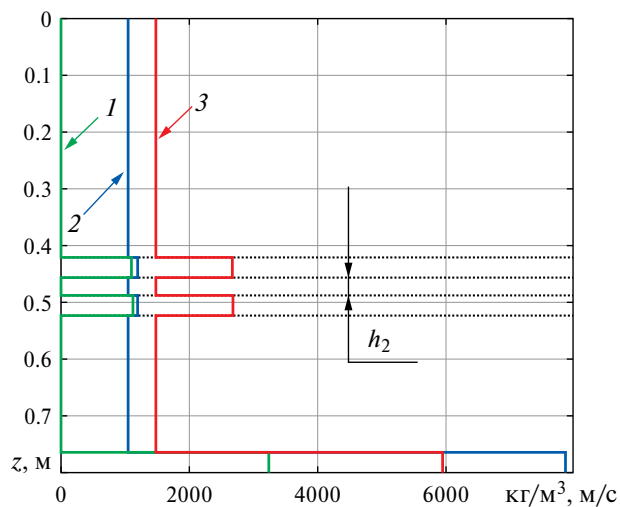


Рис. 4. Параметры модели слоистого дна, используемой в лабораторных исследованиях: 1 — поперечная скорость в слоях (м/с), 2 — плотность в слоях (кг/м^3), 3 — продольная скорость в слоях (м/с).

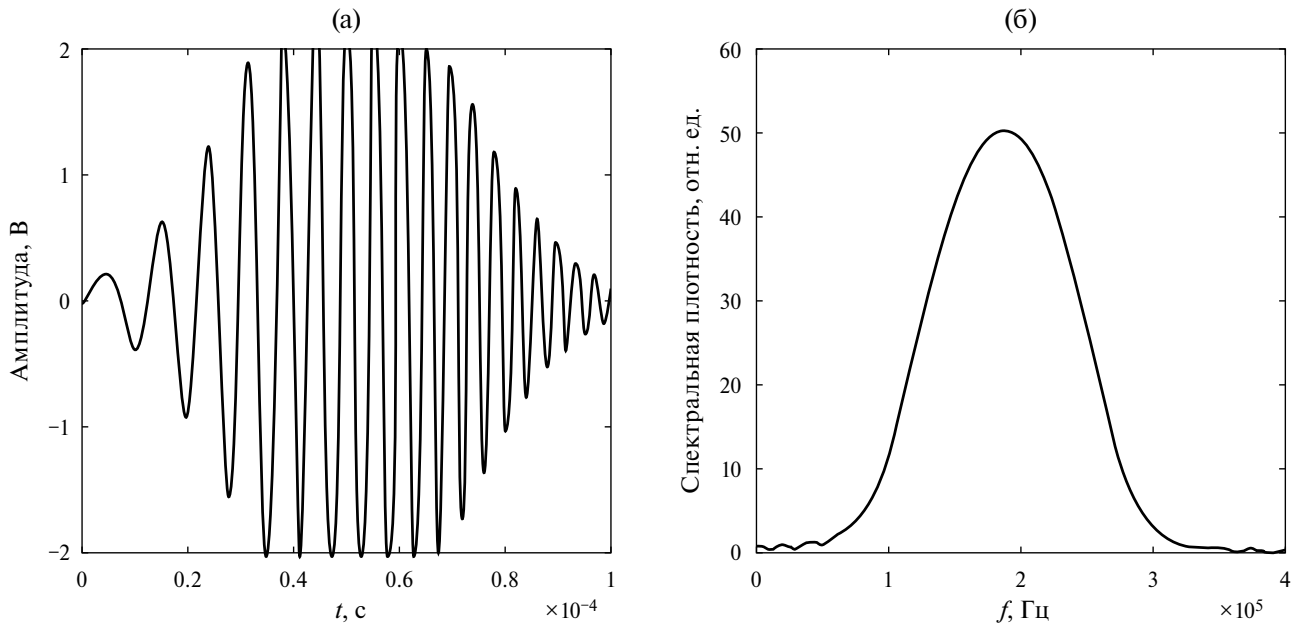


Рис. 5. Излучаемый сигнал: (а) — амплитудная характеристика, (б) — спектральная характеристика.

среду. Графики электрического сигнала, подаваемого на излучатель, и его спектральная характеристика представлены на рис. 5.

В условиях лабораторного моделирования измерения осуществлялись в присутствии помех, формируемых за счет переотражений акустических сигналов от стенок и дна бассейна, а также поверхностью жидкости. Для проведения измерений с приемлемой точностью необходимо было обеспечить подавление таких помех. В связи с этим при подготовке исследований предварительно были измерены характеристики излучателя и акустический портрет бассейна в отсутствие пластин плексигласа и подставок. Излучатель и приемник располагались в воде на глубине 8 и 9 см соответственно. Изолирующая пластина пенопласта в составе собранного комплекса (элемент 4 на рис. 3) была закреплена между излучателем и приемником с целью ослабления прямого сигнала и сигнала, отраженного от границы вода–воздух, имеющих большую амплитуду и подавляющих «полезные» сигналы, отраженные от донных слоев.

На рис. 6 представлена интенсивность измеренного сигнала с закрепленной в комплексе перегородкой из пенопласта, нормированная на максимум сигнала, отраженного от дна ванны, располагавшегося во временном интервале 850–950 мкс при глубине воды 72.5 см. Светло-голубая наклонная линия, расположенная в интервале задержек от 100 до 300 мкс соответствует сумме прямого

сигнала от источника к гидрофону и сигналов, отраженных от границы вода–воздух при движении гидрофона от источника вдоль оси x (вдоль длинной стенки ванны). Наклонные красно-зеленые линии в интервале задержек от 850 до 950 мкс соответствуют отражениям сигналов от дна и нижних частей боковых и задней стенок ванны. Расстояние Δx_{SR} , указанное по оси абсцисс на рис. 6 и далее, соответствует расстоянию между источником и

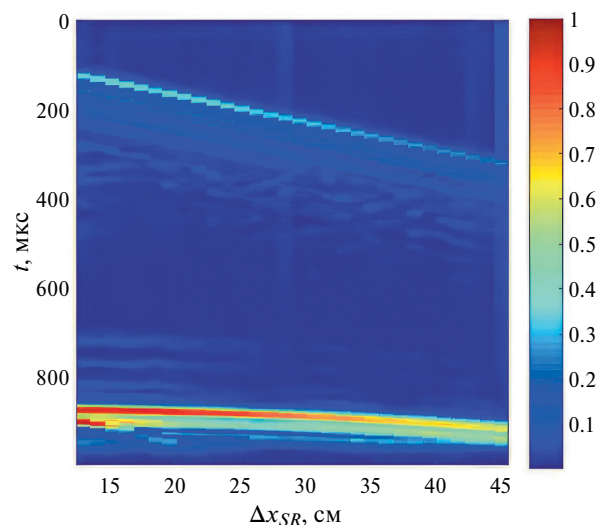


Рис. 6. Нормированная интенсивность измеренного сигнала с закрепленной перегородкой из пенопласта между излучателем и приемником без слоев плексигласа.

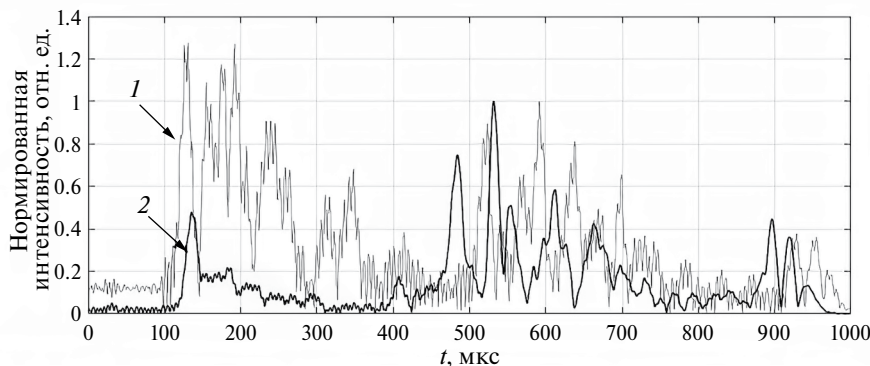


Рис. 7. Нормированные интенсивности принятых сигналов: 1 — реализация, полученная в отсутствие пенопластовой перегородки, 2 — реализация, полученная с использованием перегородки.

гидрофоном вдоль оси x , привязанной к координатному устройству лабораторной установки.

Представленные на рис. 7 экспериментальные данные, полученные при двух различных измерениях (в отсутствие пенопластовой перегородки (линия 1) и с закрепленной перегородкой (линия 2)), показывают эффективное уменьшение амплитуд прямого и отраженного от свободной поверхности воды сигналов. На рис. 7 представлены интенсивности принятых сигналов, нормированные на максимум «полезного» сигнала, соответствующего отражению от набора слоев из плексигласа, расположенных в интервале задержек от 450 до 650 мкс. Такое представление измеренных данных дает возможность сравнения относительного вклада в каждой реализации в суммарный сигнал «паразитных» сигналов, перекрывающих динамический диапазон приемной системы большой величиной своих амплитуд. «Паразитными» в данном случае являются прямой сигнал и сигнал, отраженный от свободной поверхности воды. Они регистрируются в диапазоне задержек от 100 до 200 мкс. Используемое представление измеренных данных помогает оценить эффективность использования пенопластовой перегородки для выделения «полезных» сигналов. В случае отсутствия перегородки, как видно по линии 1 на рис. 7, «паразитные» сигналы превышают вклад сигналов, отраженных от слоев плексигласа, тем самым ухудшая измеряемые данные. При использовании перегородки (линия 2 на рис. 7), «паразитные» сигналы в диапазоне задержек от 100 до 200 мкс уменьшаются более чем в 3 раза по интенсивности и не снижают точность измерений «полезных» сигналов. Таким образом, использование пенопластовой перегородки

позволило более чем в 3 раза понизить интенсивность указанных «паразитных» сигналов.

Была исследована также часть диаграммы направленности используемого в измерениях излучателя. На рис. 8 представлен поперечный разрез части нормированной диаграммы направленности при излучении ЛЧМ-импульсов в полосе от 70 до 300 кГц, в случае, когда излучатель и приемник находились на одной глубине 9 см при расстоянии между ними 13 см. По оси абсцисс на рис. 8 приведено расстояние, на которое перемещался гидрофон вдоль оси y координатной системы от середины расстояния между боковыми стенками ванны к этим боковым стенкам (отрицательные значения — в сторону одной боковой стенки, положительные значения — в сторону другой боковой стенки), в то время как излучатель находился так же в центре

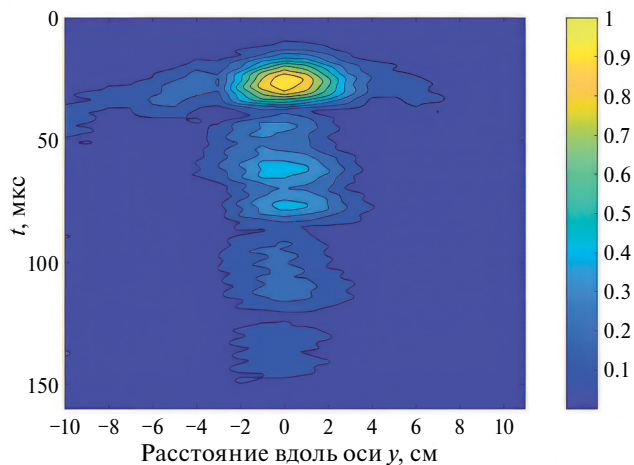


Рис. 8. Диаграмма направленности излучателя с полосой от 70 до 300 кГц в поперечном (по оси y) направлении.

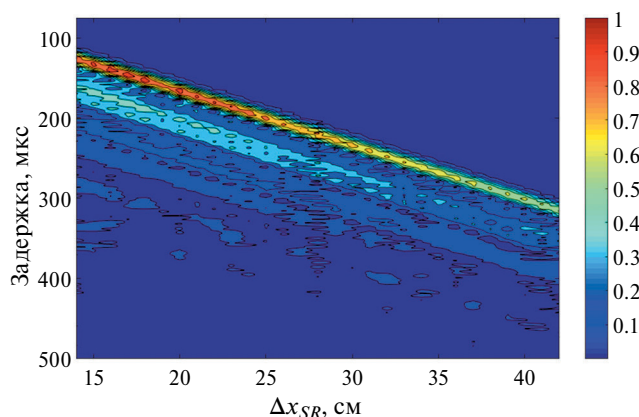


Рис. 9. Принятые сигналы в плоскости (x, z) на оси излучателя.

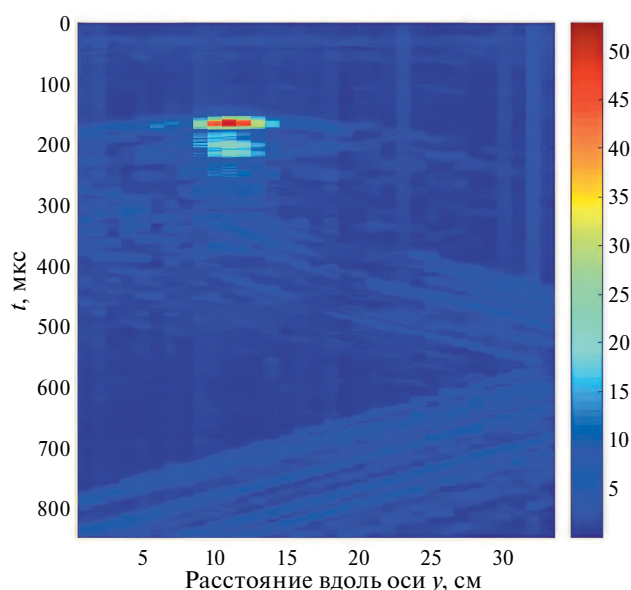


Рис. 10. Акустический портрет бассейна при излучении ЛЧМ-импульсов в полосе от 70 до 300 кГц.

между боковыми стенками (при значении $y = 0$). Как показали оценки и предварительные измерения, использование такого излучателя с узкой в поперечном сечении диаграммой направленности позволило ослабить уровень помех, формируемых при отражении от боковых стенок ванны. Измерение принятых сигналов в тех же условиях в продольном сечении в плоскости (x, z) по оси излучателя (см. рис. 9) показало отсутствие осцилляций, дифракционных максимумов и минимумов поля и подтвердило необходимую сферическую расходимость в спадаении поля, используемую также в расчетной численной модели [7].

Так как стенки и дно лабораторного бассейна имели неустраняемые неровности, то их влияние на амплитуды и задержки принимаемых сигналов трудно учесть в модели. Был измерен акустический портрет бассейна в отсутствие каких-либо слоев, отображающий все возможные сигналы, отраженные от стенок и дна бассейна. На рис. 10 представлена интенсивность сигналов, измеренных при перемещении приемника по оси y (в плоскости (y, z)) между боковыми стенками бассейна на 35 см с шагом в 1 см. По оси абсцисс на рис. 10 приведено расстояние от 1 до 35 см, на которое перемещался гидрофон вдоль оси y координатной системы с шагом 1 см от одной боковой стенки ванны к противоположной боковой стенке. Гидрофон располагался на расстоянии 60 см от излучателя по оси x . Диагональные линии в диапазоне задержек от 300 до 900 мкс соответствуют отражениям от боковых стенок бассейна. Наибольшие помеховые сигналы отражений от стенок бассейна располагались в диапазоне от 600 до 900 мкс. Исходя из полученных оценок, расположение модельных слоев, источника и приемника было выбрано таким образом, чтобы помеховые отражения не попадали в интересующие нас временные интервалы прихода «полезных» сигналов, отраженных от модели слоистого дна.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В таблице приведены данные проведенных измерений. Излучатель и приемник были закреплены на одной оси на одинаковых расстояниях от боковых стенок ванны. Излучатель располагался на глубине 8 см, приемник — на глубине 10 см. Начальное расстояние между излучателем и приемником по горизонтали составляло 14 см, приемник перемещался вдоль оси излучателя с шагом 1 см. Толщина водного слоя, моделирующего слабоконтрастный донный слой, менялась от 32 до 4.15 мм при помощи наборов распорок, устанавливаемых по углам пластин плексигласа. Толщина водного слоя с расположенными в нем излучателем и приемником менялась от 41.5 до 42.3 см. Измерения № 1 и № 2 при одинаковых геометрических параметрах экспериментов различаются постановкой в измерении № 2 пенопластовой перегородки между источником и приемником (см. рис. 7).

Рис. 11 соответствует измеренным и рассчитанным с помощью численной модели данным, полученным в измерении № 1 согласно параметрам, приведенным в таблице. Представлены

Таблица. Данные измерений в лабораторном бассейне.

№ измерения	z_S , мм	z_R , мм	d_{SR} , мм	h_2 , мм	H , мм
1	80	100	140	32	415
2	80	100	140	32	415
3	80	100	140	11	421
4	80	100	140	8.3	422
5	80	100	140	4.15	423

интенсивности сигналов на выходе согласованного фильтра в плоскости задержка расстояние между источником и приемником для (а) — измеренных данных и (б) — модели. Сравнение результатов измерений и расчетов показывает, что структура сигналов удовлетворительно совпадает с расчетами.

Для демонстрации работы численной модели отраженных от слоистого дна сигналов, на рис. 12 приведены развертки по времени сигналов, полученных в одной точке дистанции. Рис. 12а соответствует экспериментальным данным, на рис. 12б показаны рассчитанные с помощью модели по отдельности все входящие в численную модель

импульсы: линия 1 — прямой импульс, 2 — импульс, отраженный от свободной поверхности воды, 3 — импульс, отраженный от верхней границы 1 пластины плексигласа, 4 — импульс, отраженный от нижней границы 1 пластины плексигласа (граница плексиглас вода), 5 — импульс, отраженный от верхней границы 2 пластины (граница вода плексиглас), 6 — импульс, отраженный от нижней границы 2 пластины плексигласа, 7, 8 — импульсы, двукратно отраженные в верхнем слое воды, 9 — импульс, двукратно отраженный в 1 пластине плексигласа, 10 — импульс, отраженный от дна ванны.

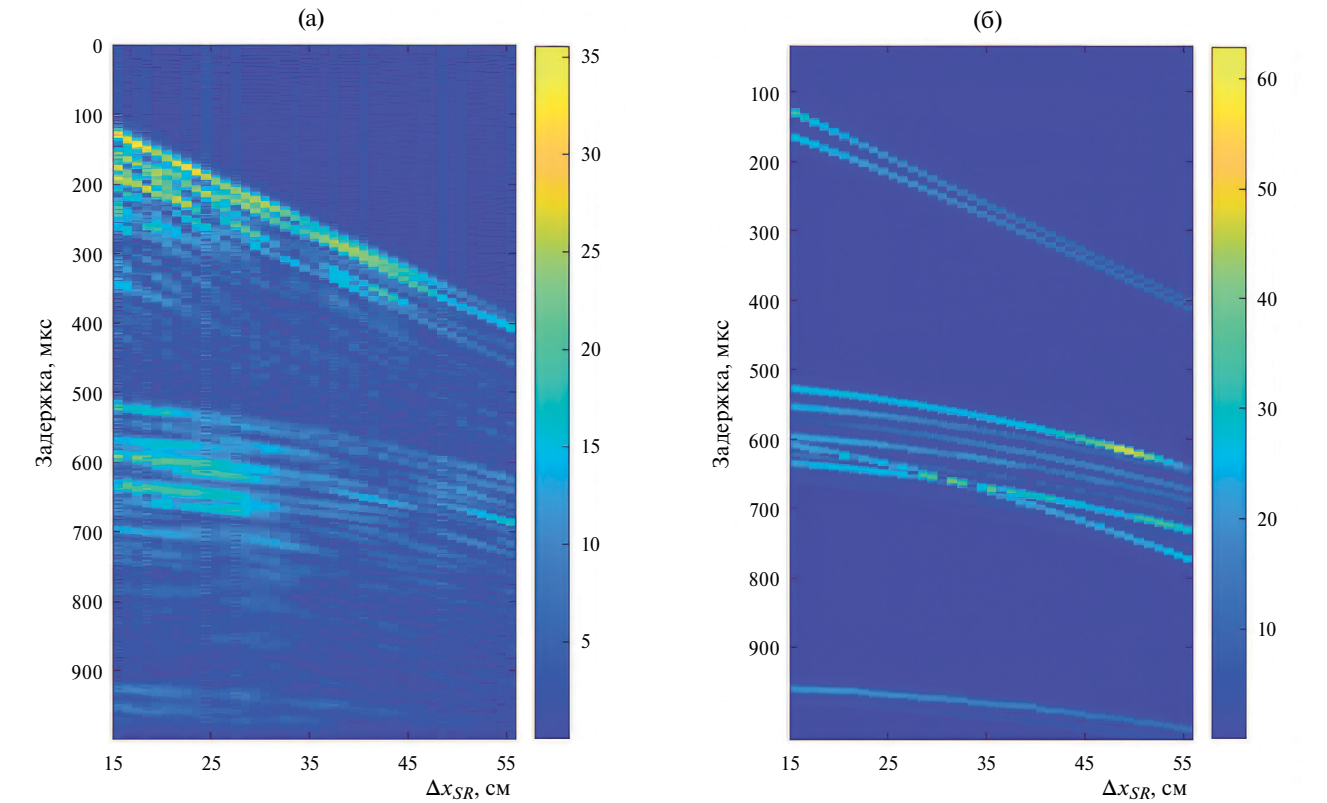


Рис. 11. Измерение № 1, интенсивность сигнала на выходе согласованного фильтра в плоскости задержка-расстояние между источником и приемником: (а) — измеренные данные, (б) — модель.

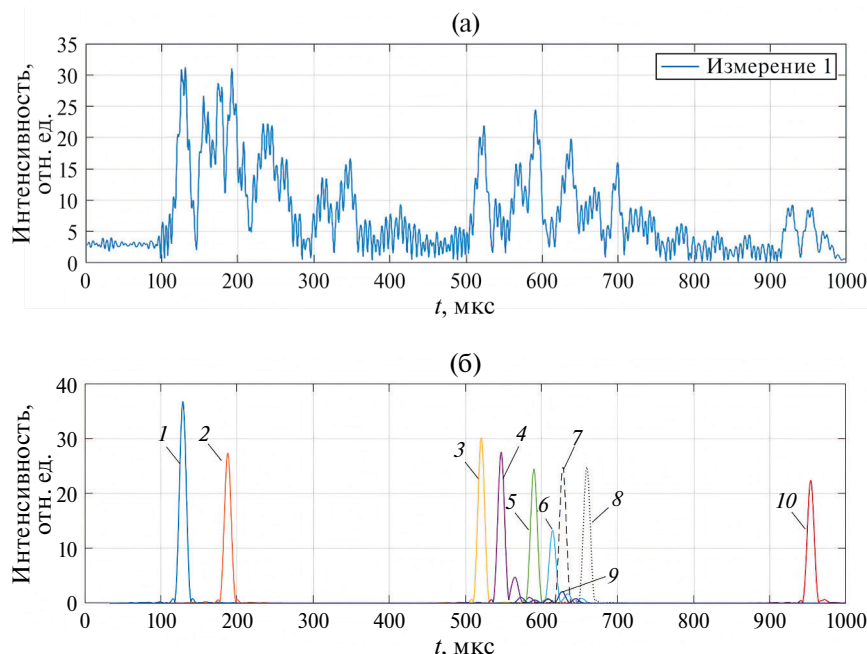


Рис. 12. Сравнение экспериментальных данных и расчетов по модели: (а) — экспериментальные данные, 1 точка дистанции; (б) — модельный сигнал с разделенными импульсами.

Приведенные и другие полученные данные показывают совпадение времен прихода отраженных импульсов между измерениями и модельными расчетами. Интересующие, в поставленной задаче, импульсы под номерами 4 и 5 (см. рис. 12) определяли границу подлежащего диагностике водного слоя. С целью уточнения возможности улучшения отношения сигнал/шум (ОСШ) при обработке измеренных данных, был исследован вопрос

накопления данных, регистрируемых в каждой точке дистанции. Для этого в каждой точке записывались по 3 измерения. Обработка показала, что суммирование с фазой по 3 реализациям принятых в одной точке дистанции сигналов не приводило к повышению ОСШ и даже увеличивало амплитуды и ширину огибающих «паразитных» сигналов вследствие больших аддитивных внешних шумов, внутренних аппаратных шумов и высокой реверберации. Однако сохранялась стабильность положения пиков отражений «полезных» сигналов.

На рис. 13 показано совмещение экспериментальных данных измерения № 1 и границ слоев, рассчитанных в модели. Разработанная экспериментальная установка и численное моделирование позволили идентифицировать в измеренных данных границы искомого слоя воды.

Далее между источником и приемником была закреплена заглушающая «паразитные» сигналы пенопластовая перегородка. На рис. 14–17 приведены полученные в измерениях № 2–5 данные и соответствующие им расчетные границы диагностируемого водного слоя, толщина которого уменьшалась с 32 до 4.15 мм. Для более контрастной демонстрации отражений на рис. 146–176, интенсивность на выходе согласованного фильтра возведена в квадрат и нормирована на максимум.

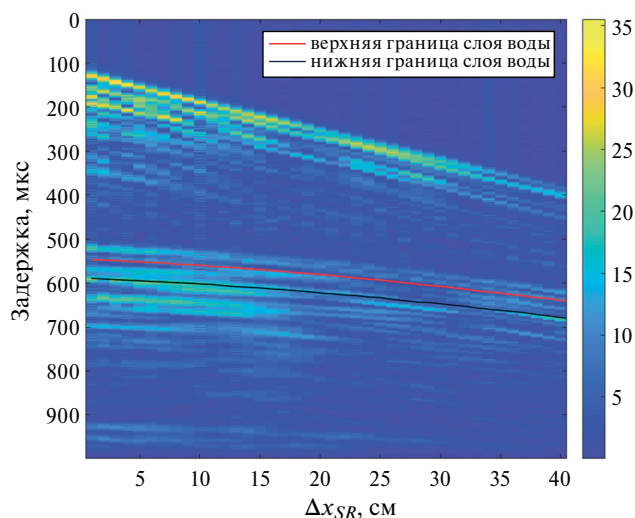


Рис. 13. Совмещение экспериментальных данных и границ слоев, рассчитанных по модели.

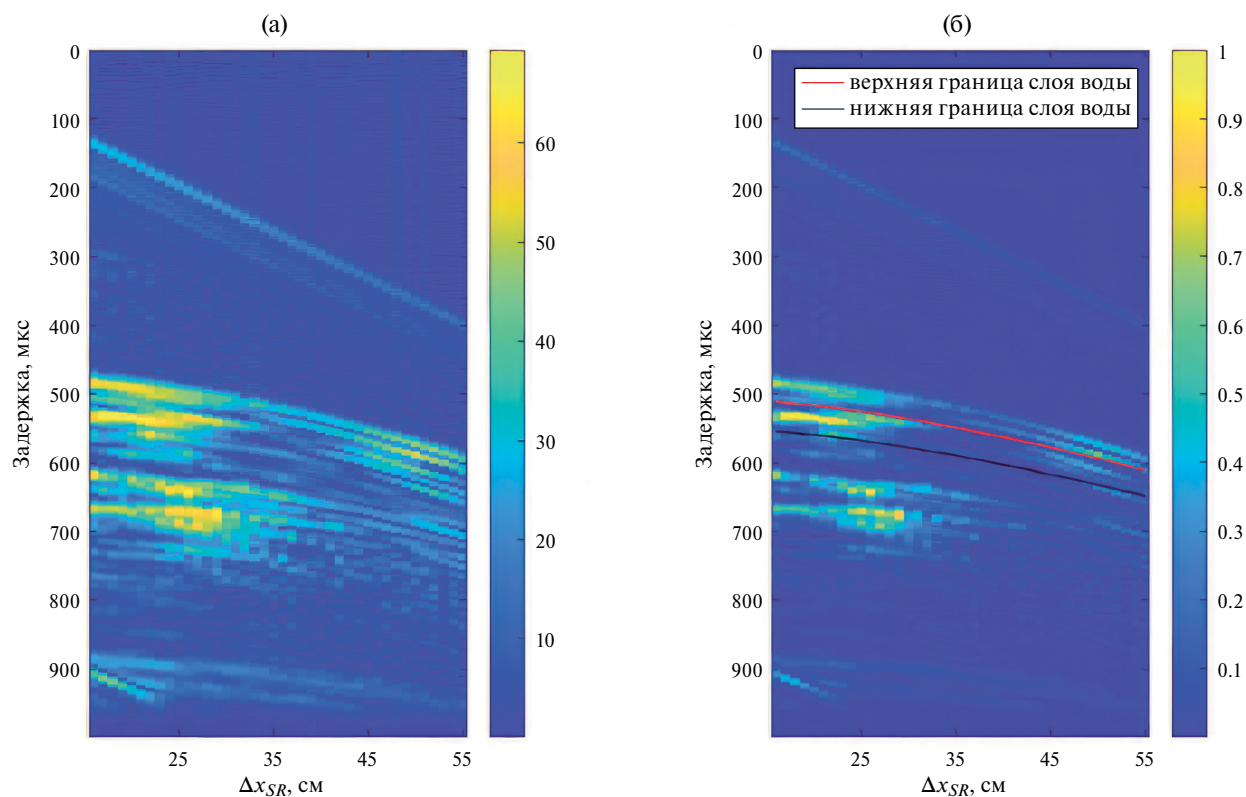


Рис. 14. Измерение № 2 (с перегородкой из пенопласта), слой воды $h_2 = 32$ мм.

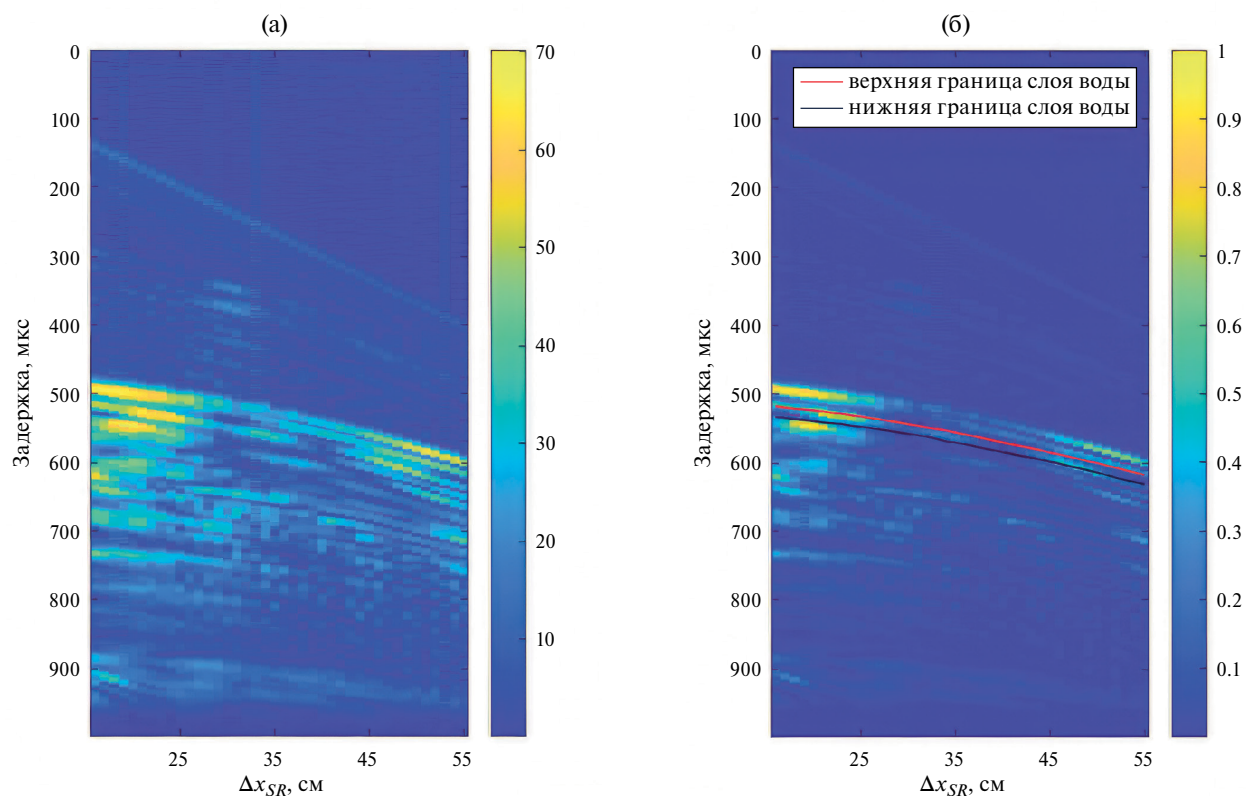


Рис. 15. Измерение № 3 (с перегородкой из пенопласта), слой воды $h_2 = 11$ мм.

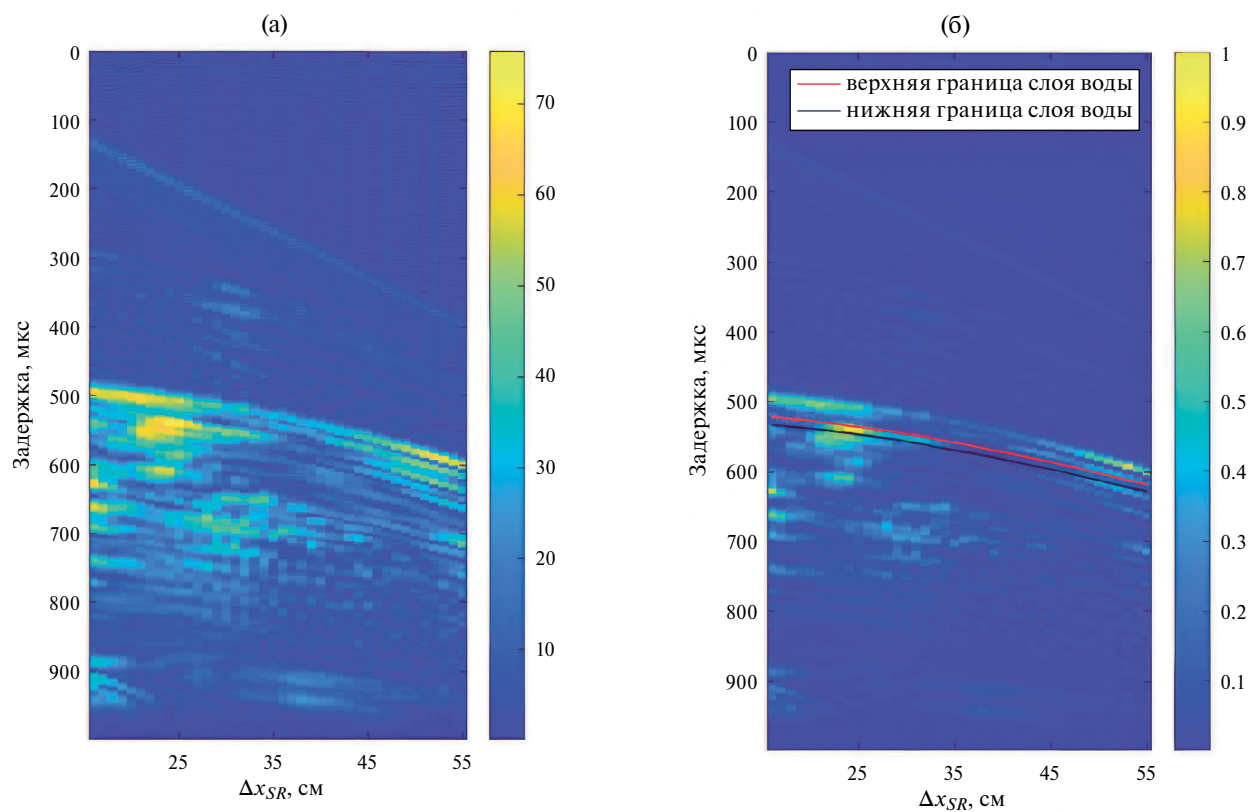


Рис. 16. Измерение № 4 (с перегородкой из пенопласта), слой воды $h_2 = 8.3$ мм.

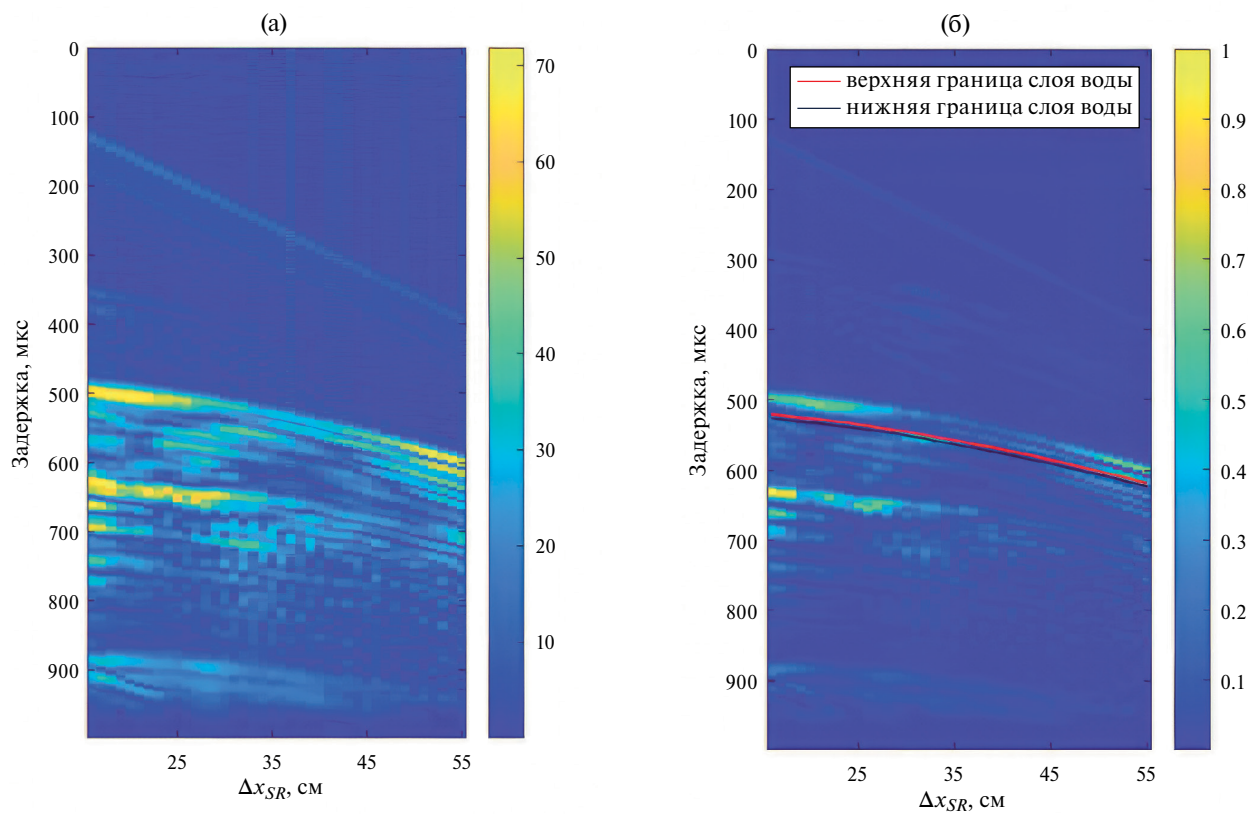


Рис. 17. Измерение № 5 (с перегородкой из пенопласта), слой воды $h_2 = 4.15$ мм.

Анализ приведенных данных показывает, что при толщине водного слоя 32 мм и 11 мм удалось при помощи рассчитанной модели на экспериментальных данных выделить границы слабоконтрастного слоя воды. При дальнейшем уменьшении толщины водного слоя, отраженные импульсы накладываются, ухудшая интерференционную картину отражений. Плотности воды и плексигласа практически совпадают, плотность воды только в 1.14 раза меньше плотности плексигласа. Разница в продольных скоростях больше — в 1.8 раз быстрее волна распространяется в плексигласе, чем в воде. Чем меньше контрастность в отношениях параметров, тем толще должен быть слой воды для обнаружения его с помощью разработанной модели.

Проведенный эксперимент подтверждает соответствие развитой модели и реальных данных. Таким образом, использование данной модели помогает выделить и определить местоположение малоконтрастных донных слоев даже при высоком уровне шумов, маскирующих полезные сигналы.

Для предварительных оценок по выделению области геоакустических параметров, где границы искомого слоя можно выделить с высокой точностью, рассмотрим, как и в эксперименте, случай, когда жидкий слой, а конкретно — вода, расположен между двумя упругими слоями с одинаковыми геоакустическими параметрами (плотность, продольная и поперечная скорости). Зафиксируем параметры жидкого слоя, т.е. водного, а также примем толщину искомого слоя воды, равную 8 мм. Будем менять параметры упругих слоев сверху и снизу относительно параметров водного слоя, а именно скорость продольных волн и плотность в некоторых интервалах. Остальные расчетные параметры задачи примем такими же, как при проведении лабораторных экспериментов (см. рис. 4). На рис. 18 представлены результаты таких расчетов. Построена величина разности двух сигналов: в первом сигнале суммированы все сигналы, отраженные от донных слоев, а также двукратно отраженные сигналы в волноводе и в первом упругом слое дна; во втором сигнале учтены отражения только от верхней и нижней границы искомого водного слоя в отсутствие шумов. Область, выделенная синим цветом при значениях, когда разности сигналов стремятся к 0, соответствует наилучшему качеству выделения границ слоя воды при его заданной толщине. Для использованных в расчетах параметров область наилучшего соответствия выделяется там, где величина продольной скорости попадает в интервал значений от 1150 м/с до

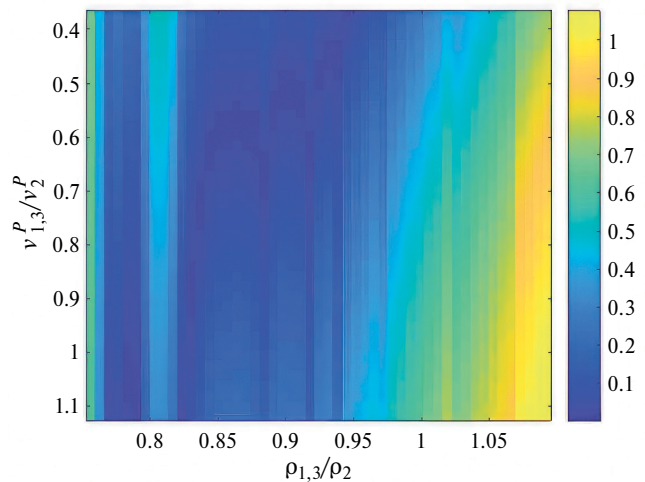


Рис. 18. Пример расчета области параметров (плотности и скорости продольных волн) слоев при заданной толщине водного слоя 8 мм.

1600 м/с при величине плотности вещества, из которого состоят приграничные к слою воды слои — от 1000 до 1110 кг/м³. Аналогичным образом можно проводить предварительные оценки необходимой толщины искомого слоя по фиксированным геоакустическим параметрам.

ВЫВОДЫ

Проведенное экспериментальное исследование показало возможность применения метода когерентного зондирования слоистых сред, имеющих относительно близкие по величине акустические параметры. Такого рода измерения используются для апробации методов сейсмоакустического зондирования, в условиях, когда большую часть параметров, характеризующих условия измерений, можно с достаточной точностью контролировать. Вместе с тем, точность реконструкции при экспериментах в бассейне может ограничиваться высоким уровнем паразитных отражений. Разработанный для решения рассматриваемой задачи комплекс масштабного физического моделирования позволил осуществить измерения при контролируемых условиях проведения эксперимента, что трудно обеспечить при проведении измерений в морских условиях. Было показано, что точность измерения сейсмоакустических сигналов в созданной экспериментальной установке ограничивается в основном неоднородно распределенными помехами, являющимися отражениями от боковых стенок бассейна. Однако, проведя предварительные исследования принимаемых сигналов, части диаграммы

направленности излучателя и построив акустический портрет бассейна, удалось расположить излучатель и приемник таким образом, чтобы по временным задержкам отстроиться от паразитных сигналов и с высоким разрешением получить области отражений полезных сигналов, соответствующие границам малоконтрастного (в сравнении с параметрами пластин плексигласа) водного слоя.

В результате обработки данных, полученных при проведении эксперимента в лабораторном бассейне, было показано хорошее соответствие разработанной модели отражения зондирующих акустических импульсных сигналов от слоистого дна и данных физического моделирования. Подобные лабораторные эксперименты с контролируемыми условиями их проведения позволяют уточнять и дополнять разработанные математические модели. В частности, в разработанной математической модели при сравнении расчетов с экспериментом, были учтены двукратные отражения сигналов в волноводе и в первом донном слое.

Предложенная в статье модель может быть применена для расчета реверберации когерентных гидроакустических сигналов с учетом волноводных эффектов в стратифицированном океане. Для такой постановки задачи отсутствуют известные программные пакеты, а имеющиеся модели требуют верификации [12] и, возможно, доработки. Успешная апробация предложенной в статье модели в контролируемых условиях лабораторного эксперимента подтверждает ее работоспособность.

В данном исследовании не все области полученного отраженного сигнала были до конца исследованы и определены причины их возникновения, поскольку работа была, прежде всего, сфокусирована на исследовании возможностей определения тонких и слабоконтрастных слоев, которая и была подтверждена на основе сопоставления результатов эксперимента с модельными расчетами. Показано также, что на основании анализа плоскости геоакустических параметров могут быть оценены возможности перспективного метода диагностики малоконтрастных донных слоев, что, однако, по мнению авторов уже выходит за рамки данной работы и может являться темой отдельного исследования. В продолжение данных исследований авторами планируется дальнейшее изучение влияния величины геоакустических параметров донных слоев и уровня аддитивных шумов на возможность выделения искомым границ слоя и уточнение расчетных моделей. Кроме того, дальнейшим развитием данной работы может стать исследование

возможностей обнаружения посредством когерентного зондирования дна объекта, располагающегося в толще слабоконтрастных донных слоев на примере физических моделей на базе созданной лабораторной установки.

Постановка задачи, проведение лабораторного эксперимента, обработка экспериментальных данных и численное моделирование выполнены в рамках базовой части государственного задания ННГУ (тема № 0729-2020-0037). Работа по развитию теоретической модели выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 20-77-10081 (<https://rscf.ru/project/20-77-10081/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лебедев А. В., Малеханов А. И. Когерентная сейсмоакустика // Известия вузов. Радиофизика. 2003. Т. 46. № 7. С. 579–597.
2. Лазарев В. А., Малеханов А. И., Мерклин Л. Р., Романова В. И., Стромков А. А., Таланов В. И., Хилько А. И. Экспериментальное исследование возможностей сейсмоакустического зондирования морского дна когерентными импульсными сигналами // Акуст. журн. 2012. Т. 58. № 2. С. 227–236.
3. Лазарев В. А., Малеханов А. И., Мерклин Л. Р., Романова В. И., Таланов В. И., Хилько А. И. Когерентное сейсмоакустическое профилирование морского дна с использованием широкополосных сигналов // Океанология. 2013. Т. 53. № 6. С. 843–850. <https://doi.org/10.7868/S0030157413050079>
4. Авербах В. С., Коньков А. И., Лебедев А. В., Малеханов А. И., Мананов С. А., Таланов В. И. Методы когерентной инженерной сейсморазведки в ИПФ РАН // Технологии сейсморазведки. 2015. № 2. С. 119–123. <https://doi.org/10.18303/1813-4254-2015-2-119-123>
5. Калинина В. И., Смирнов И. П., Малеханов А. И., Хилько А. И. Когерентная морская сейсмоакустика: новые подходы к реконструкции структуры донных слоев в шельфовых акваториях // Известия РАН. Сер. Физ. 2017. Т. 81. № 8. С. 1020–1027. <https://doi.org/10.7868/S0367676517080038>
6. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы: Учебник для вузов. М.: Радио и связь, 1986. 512 с.
7. Калинина В. И., Смирнов И. П., Хилько А. И., Малеханов А. И. Сравнительный анализ помехоустойчивости алгоритмов реконструкции геоакус-

- тических параметров морского дна методом когерентного зондирования // Акуст. журн. 2021. Т. 67. № 4. С. 395–412. <https://doi.org/10.31857/S0320791921040031>
8. Сейсморазведка. Справочник геофизика / Под ред. Гурвича И.И., Номоконова В.П. М.: Недра, 1981. 464 с.
 9. Бреховских Л. М., Лысанов Ю. П. Теоретические основы акустики океана. М.: Наука, 2007. 370 с.
 10. Урик Р. Дж. Основы гидроакустики. Л.: Судостроение, 1980. 448 с.
 11. Harris F. On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform // Proc. of the IEEE. 1978. V. 66. № 1. P. 51–83. <https://doi.org/10.1109/PROC.1978.10837>
 12. Jenserud T., Ivansson S. Measurements and Modeling of Effects of Out-of-Plane Reverberation on the Power Delay Profile for Underwater Acoustic Channels // IEEE J. of Oceanic Engineering. 2015. V. 40. № 4. P. 807–821. <https://doi.org/10.1109/JOE.2015.2475675>

PHYSICAL MODELING OF THE METHOD OF COHERENT PROBING OF LOW-CONTRAST BOTTOM LAYERS IN A LABORATORY POOL

V. I. Kalinina^{a,b,*}, P. N. Vyugin^b, I. A. Kapustin^{a,b}

^a*Institute of Applied Physics RAS, st. Ulyanova 46, Nizhny Novgorod, 603950 Russia*

^b*Nizhny Novgorod State University named after. N.I. Lobachevsky, Gagarin Ave. 23, Nizhny Novgorod, 603022 Russia*

**e-mail: v.kalinina@ipfran.ru*

Under laboratory conditions, experimental verification of the developed algorithms for the reconstruction of low-contrast bottom layers during their coherent sensing was carried out. The algorithms use parametric models for generating signals reflected from a layered half-space in the form of a set of elastic layers. To solve the problem at the Department of Acoustics of Nizhny Novgorod State University named after. N. I. Lobachevsky created an experimental setup for the formation, emission and reception of high-resolution sound pulses reflected from a set of elastic layers placed in a pool of water. The experimental study showed the possibility of using the coherent sensing method for layered media with relatively similar acoustic parameters. As a result of processing the data obtained during the experiment in a laboratory pool, good agreement was shown between the developed computational model of the reflection of sounding acoustic pulse signals from a layered bottom and physical modeling data. It is shown that based on the analysis of the plane of geoacoustic parameters of a specific problem using the developed numerical model, the capabilities of a promising method for coherent diagnostics of low-contrast bottom layers can be assessed.

Keywords: laboratory experiment, seismoacoustic sounding, seabed, low-contrast layers