

УДК 519.876.5 + 551.463.256

© Д. В. Чиров
ЗАО «СПИИРАН-НТБВТ», Санкт-Петербург
dch-12@yandex.ru

КОМПЬЮТЕРНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ИСТОЧНИКА ЗВУКА В МЕЛКОВОДНОМ ВОЛНОВОДЕ

Рассмотрены теоретические основы и особенности практической реализации голографического метода восстановления акустического поля и визуализации источника звука в пространстве мелководного волновода, относящегося к методам согласованной со средой обработки гидроакустической информации. Показана связь характеристик восстановленного акустического поля источника звука с комплексной передаточной характеристикой волновода, определяемой на основе решения волнового уравнения. Отмечается простота восстановления поля источника путем обращения вычислительных процедур расчета передаточной характеристики волновода методом конечных разностей по явной расчетной схеме. Представлены результаты вычислительных экспериментов по исследованию эффективности метода в условиях неоднородной подводной среды. При этом каждый вычислительный эксперимент состоял из двух этапов: вычисления голограммы поля точечного источника звука и последующего восстановления акустического поля в волноводе по вычисленной голограмме. Для вычислительных экспериментов был выбран мелководный волновод с ровным дном и с положительной рефракцией акустических лучей от поверхности до дна. Рассмотрены три упрощенные модели неоднородной подводной среды: с мелкомасштабной турбулентностью, с внутренней волной, с тонкой структурой вертикального распределения скорости звука. Показано, что неучтенные неоднородности скорости звука, имеющие большую протяженность вдоль волновода, оказывают существенное негативное влияние на эффективность восстановления поля точечного источника звука голографическим методом. Это влияние может быть уменьшено путем уточнения параметров среды вдоль волновода.

Ключевые слова: компьютерная визуализация, мелководный волновод, изображение источника звука, акустическое поле, волновое уравнение, метод конечных разностей, голограмма.

Визуализация источника звука в подводной среде по сигналам, принимаемым акустической антенной, обеспечивает возможность его локализации по дистанции и глубине, а также частичной классификации в момент обнаружения. При этом сущность метода визуализации источника в подводном волноводе заключается в построении изображения, характеризующего пространственное распределение интенсивности акустического поля, восстановленного по сигнальной информации, полученной из области размещения апертуры приемной антенны. На полученном изображении источник может выделяться цветом или контрастом по отношению к фону.

Восстановление поля источника звука в волноводе может быть осуществлено голографическим методом. В работах [1, 2] были рассмотрены принципы голографии в применении к акустике океана и, в частности, отмечается, что в качестве акустической голограммы, несущей информацию об акустическом поле на фиксированной частоте, может рассматриваться запись комплексных амплитуд волнового процесса на этой частоте в некоторой области пространства. При этом, ввиду возможности непосредственного измерения комплексной амплитуды поля в акустике, регистрация голограммы может осуществляться простой записью результатов измерений этой величины.

Особенностью задачи акустической голографии является необходимость учета явлений рефракции звуковых волн в неоднородной океанической среде, взаимодействия этих волн с поверхностью и дном волновода, а также их затухания. В этой связи, восстановление поля источника звука в океаническом волноводе голографическим методом не может быть реализовано с использованием оператора Фурье—Френеля так, как это делают в радиоголографии и оптике [2, 3].

В работе [4] был предложен голографический метод восстановления поля источника звука, использующий оценку волнового фронта акустического поля в области размещения апертуры приемной антенны. Голограмма поля при этом формировалась на основе вычисления амплитуд и фаз, приходящих на антенну нормальных волн, а восстановление поля источника звука осуществлялось с использованием оператора Фурье. Этот метод восстановления поля в волноводе получил название метода восстановления в свободном пространстве. Возможность восстановления поля в свободном пространстве и локализации источника звука в волноводе, охарактеризованном его расчетной моделью, была подтверждена результатами экспериментальных работ, проведенных в 1980—90-х гг. [4—6]. Альтернативой методу восстановления в свободном пространстве является метод голографического восстановления поля в пространстве волновода, основанный на решении волнового уравнения [7—9]. Восстановление поля источника обоими методами требует расчета передаточной характеристики волновода с использованием численных методов решения волнового уравнения, что позволяет отнести их к методам согласованной со средой пространственно-временной обработки сигналов (англ. *matched-field processing*) [10—18].

В работе [19] отмечается перспективность голографического метода обращения волнового фронта для восстановления поля источника звука в условиях волновода, обусловленная отражениями звуковых волн от поверхности и дна. В этом случае восстановление поля источника осуществляется с использованием приемной антенны, включающей реальную приемную антенну в волноводе и «мнимые» приемные антенны, формируемые за границами волновода в результате симметричного отображения относительно каждой границы реальной антенны и расположенных по одну с ней сторону от этой границы «мнимых» антенн. При этом достигается дальность фокусировки восстановленного в результате обращения волнового фронта акустического поля, значительно превышающая поперечные размеры волновода.

Проведенные эксперименты по реализации согласованной со средой пространственно-временной обработки сигналов в мелководных и глубоководных подводных волноводах позволили сделать следующие выводы [10]:

- в диапазоне частот от нескольких десятков до сотен герц интерференционная картина поля для ограниченного числа суммируемых когерентно нормальных волн (низкомодовая составляющая сигнала) сохраняет высокую пространственно-временную стабильность, а имеющиеся расчетные модели волноводов обеспечивают на этих частотах хорошее совпадение с экспериментальными данными;

- введение широкополосной обработки, усредняющей узкополосные изображения поля источника звука в волноводе, обеспечивает устранение дополнительных максимумов, приводящих к неоднозначности его локализации.

Совершенствование вычислительной техники, алгоритмического и программного обеспечения расчетов акустического поля, накопление данных об океане и появление технологий оперативной океанологии, позволяющих проводить динамический мониторинг изменяющихся характеристик океанических волноводов и сопряженных с интеллектуальными геоинформационными системами, способствуют дальнейшему развитию голографического метода восстановления поля источника звука в пространстве волновода в интересах компьютерной визуализации этого источника.

Теоретической основой голографического метода восстановления акустического поля в пространстве волновода являются следующие положения. В соответствии с подходом, последовательно изложенным в работах [20, 21], свойства подводного звукового канала могут быть определены при помощи комплексной передаточной функции канала $H(\mathbf{r}_s, \mathbf{r}_r, f, t)$, зависящей от радиусов-векторов точек излучения (\mathbf{r}_s) и приёма (\mathbf{r}_r) сигнала, а также от частоты (f) и времени (t). Физический смысл передаточной функции заключается в описании пространственно-временной зависимости комплексной огибающей монохроматической волны, проходящей через волновод и определяющейся исключительно пространственно-временными свойствами этого волновода.

В условиях стационарности свойств волновода и допустимости пренебрежения эффектами рассеяния звука на случайных неоднородностях среды передаточную функцию канала можно считать детерминированной характеристикой, вычисляемой на основе решения волнового уравнения. По данным работ [20, 21] искажением картины поля в мелководном волноводе, обусловленным рассеянием звука на случайных неоднородностях морской среды, можно пренебречь на частотах от нескольких десятков до нескольких сотен герц и на дистанциях от единиц до десятков километров.

В работах [22, 23] для математического описания синтеза голограммы $G(\xi, \eta, \zeta)$ на произвольной поверхности наблюдения $O(\xi, \eta, \zeta)$, заданной в пространственных координатах (ξ, η, ζ) , и восстановления по ней исходного поля комплексной амплитуды $A_0(x, y, z)$ волнового монохроматического процесса на поверхности объекта $S(x, y, z)$, заданной в координатах (x, y, z) , были использованы прямое и обратное интегральные преобразования вида

$$G(\xi, \eta, \zeta) = \iiint_{S(x,y,z)} A_0(x, y, z) \cdot T(x, y, z; \xi, \eta, \zeta) dx dy dz, \quad (1)$$

$$A_0(x, y, z) = \iiint_{O(\xi,\eta,\zeta)} G(\xi, \eta, \zeta) \cdot \bar{T}(\xi, \eta, \zeta; x, y, z) d\xi d\eta d\zeta, \quad (2)$$

где $T(x, y, z; \xi, \eta, \zeta)$ и $\bar{T}(\xi, \eta, \zeta; x, y, z)$ — ядра соответствующих интегральных преобразований, зависящие от взаимного положения объекта и поверхности наблюдения. При этом ядро $\bar{T}(\xi, \eta, \zeta; x, y, z)$ является взаимным ядром $T(x, y, z; \xi, \eta, \zeta)$.

Для точечного источника звука S (рис. 1), размещенного в точке, определяемой радиус-вектором \mathbf{r}_s в пространстве волновода W , простирающемся от начала координат до области размещения приемной антенны R , на выходах которой формируется голограмма, можно записать $A_0(\mathbf{r}) = A_0 \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_s)$, где $\delta(\mathbf{r})$ — δ -функция Дирака.

В этом случае в интегральном преобразовании (1) можно перейти от интегрирования по поверхности объекта $S(x, y, z)$ к интегрированию по пространству волновода W в соответствии с выражением

$$G(\mathbf{r}_g) = \int_{\mathbf{r} \in W} A_0 \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_s) \cdot T(\mathbf{r}, \mathbf{r}_g) d\mathbf{r} = A_0 \cdot T(\mathbf{r}_s, \mathbf{r}_g). \quad (3)$$

При условии представления акустической голограммы в виде записи комплексных амплитуд монохроматического волнового процесса на выходах приемной антенны, ядро интегрального преобразования $T(\mathbf{r}, \mathbf{r}_g)$ приобретает физический смысл комплексной передаточной характеристики $H(\mathbf{r}, \mathbf{r}_g)$, связывающей произвольные точки волновода \mathbf{r} и области размещения приемной антенны \mathbf{r}_g , на частоте волнового процесса. В этом случае для выражения (3) можно записать

$$G(\mathbf{r}_g) = A_0 \cdot H(\mathbf{r}_s, \mathbf{r}_g), \quad (4)$$

где $H(\mathbf{r}_s, \mathbf{r}_g)$ — комплексная передаточная характеристика волновода от точки размещения источника звука \mathbf{r}_s до точки размещения приемной антенны \mathbf{r}_g .

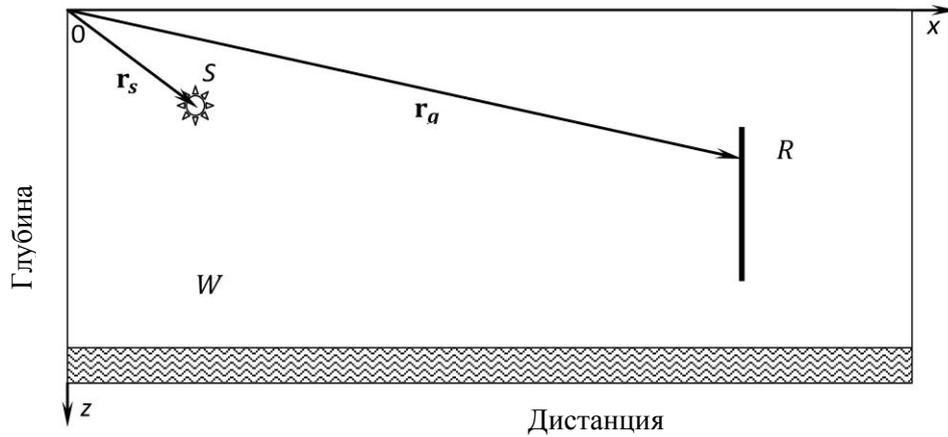


Рис. 1. Геометрия двумерной задачи формирования голограммы акустического поля и его восстановления в подводном волноводе.

W — пространство волновода; S — точечный источник звука; R — приемная антенна; \mathbf{r}_s — радиус-вектор точки размещения источника звука; \mathbf{r}_g — радиус-вектор точки размещения элемента приемной антенны.

Восстановление поля в волноводе на частоте записи голограммы осуществляется согласно выражению (2) с использованием ядра интегрального преобразования $\bar{T}(\mathbf{r}_g, \mathbf{r})$. Подстановка выражения (4) в преобразование (2) позволяет записать

$$A_0 \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_s) = A_0 \cdot \int_{\mathbf{r}_g \in R} H(\mathbf{r}_s, \mathbf{r}_g) \cdot \bar{T}(\mathbf{r}_g, \mathbf{r}) d\mathbf{r}_g. \quad (5)$$

Можно показать, что интеграл в правой части выражения (5) для каждой точки волновода \mathbf{r} представляет собой выражение трехмерной свертки, позволяющей ядро интегрального преобразования $\bar{T}(\mathbf{r}_g, \mathbf{r})$ рассматривать как импульсную характеристику восстанавливающего акустическое поле пространственного фильтра, частотная характеристика которого связана с пространственной частотной характеристикой комплексной передаточной характеристики волновода $H(\mathbf{r}_g, \mathbf{r})$ взаимно обратным соотношением. Согласно определению работы [24] такой фильтр можно назвать инверсным пространственным фильтром.

Необходимым условием восстановления акустического поля является расчет комплексной передаточной характеристики волновода, выполняемый на основе решения волнового уравнения. Одним из наиболее теоретически обоснованных и практически апробированных методов решения волнового уравнения в двумерно-неоднородной среде является метод конечных разностей, развитый применительно к задачам акустики В. Ю. Завадским [7—9]. Метод обеспечивает расчет комплексной передаточной характеристики волновода на основе приведения исходного эллиптического дифференциального волнового уравнения для комплексной амплитуды поля к уравнению Гельмгольца. В двумерном случае при x и z — горизонтальной и вертикальной координатах, для точечного источника, размещенного в поперечном сечении волновода $x = 0$, комплексная амплитуда поля $U(x, z)$ определяется уравнением Гельмгольца вида

$$\frac{\partial^2 U(x, z)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U(x, z)}{\partial z^2} + k^2(1 + \varepsilon \varphi(x, z))U(x, z) = 0, \quad (6)$$

где $0 \leq \varphi(x, z) \leq 1$, ε — параметр неоднородности волновода, определяемый диапазоном изменения в нем скорости звука, k — волновое число. При этом уравнение (6) описывает поле волн, распространяющихся вдоль волновода в противоположных направле-

ниях. Для распространяющихся от источника волн можно принять $U(x, z) = V(x, z)\exp(jkx)$. В этом случае уравнение (6) приводится к виду

$$\frac{\partial^2 V(x, z)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V(x, z)}{\partial z^2} + 2jk \frac{\partial V(x, z)}{\partial x} + k^2 \varepsilon \varphi(x, z) V(x, z) = 0, \quad (7)$$

позволяющему выполнить расчет комплексной передаточной характеристики волновода с использованием решения разностной аппроксимации записанного уравнения.

Суть метода конечных разностей при этом сводится к выбору размеров ячейки расчетной сетки, накладываемой на волновод, замене производных в уравнении (7) конечными разностями и построении расчетной схемы, обеспечивающей вычисление значений величины $V(x, z)$ в узлах расчетной сетки. Расчет выполняется на последовательных шагах продвижения вдоль волновода в его поперечных сечениях. В работах [7—9] показано, что в условиях малого параметра неоднородности ε , соответствующих реальным морским волноводам, при определенном выборе шага по каждой из координат разностный аналог уравнения (7) хорошо аппроксимирует только распространяющиеся от источника волны, что позволяет исключить влияние бегущих к источнику обратных волн. Комплексная передаточная характеристика волновода $H(x, z)$ в этом случае определяется выражением $H(x, z) = V(x, z)\exp(jkx)$.

Использование в методе конечных разностей явной расчетной схемы, при которой значение величины $V(x, z)$ в каждом узле расчетной сетки определяется по ее значениям в соседних узлах, позволяет реализовать принцип локальной причинности при расчете передаточной характеристики волновода. Этот принцип открывает возможность простой реализации для каждой точки волновода (x, z) процедуры восстановления акустического поля от каждой точки голограммы (x_r, z_r) , согласно выражению (5), на основе пошагового расчета в сечениях волновода его передаточной характеристики от этой точки до точки голограммы по явной расчетной схеме. При этом каждая точка голограммы рассматривается в качестве источника восстанавливаемого поля, а сам процесс восстановления сводится к пошаговому расчету в сечениях волновода от точки голограммы до точки восстановления значений поля, определяемых путем обращения вычислительных операций расчета передаточной характеристики на каждом шаге.

Оценка возможности визуализации точечного источника звука в подводном волноводе выполнена в рамках настоящей работы на основе численного моделирования восстановленного голографическим методом в пространстве волновода акустического поля. Каждый вычислительный эксперимент состоял из двух этапов: вычисления голограммы поля точечного источника звука и последующего восстановления акустического поля в волноводе по вычисленной голограмме с использованием явной расчетной схемы.

Для вычислительных экспериментов был выбран волновод глубиной 200 м с ровным дном и детерминированными свойствами в виде вертикального распределения скорости звука, обеспечивающего положительную рефракцию акустических лучей от поверхности до дна. Геометрия задачи моделирования формирования голограммы акустического поля и его восстановления в подводном волноводе показана на рис. 2.

Длина трассы расчета составляла 26 км. Точечный источник звука размещался на глубине 70 м на дистанции 10 км от начала трассы. Голограмма поля формировалась на выходах линейных дискретных эквидистантных антенных решеток: вертикальной (R_v) с числом элементов $N = 1, 5, 10$ или горизонтальной (R_h) с числом элементов $N = 10$, размещенных на расстоянии 25 км от начала трассы. Рассматривались две горизонтальные антенны с межэлементными расстояниями 7.7 и 77 м. Восстановление поля источника выполнялось в полосе рабочих частот 300...500 Гц. Результаты вычислительных экспериментов представлены в виде изображения интенсивности восстановленного акустического поля и разрезов по поперечному и продольному сечениям волновода, пересекающихся в точке изображения с максимальной интенсивностью поля.

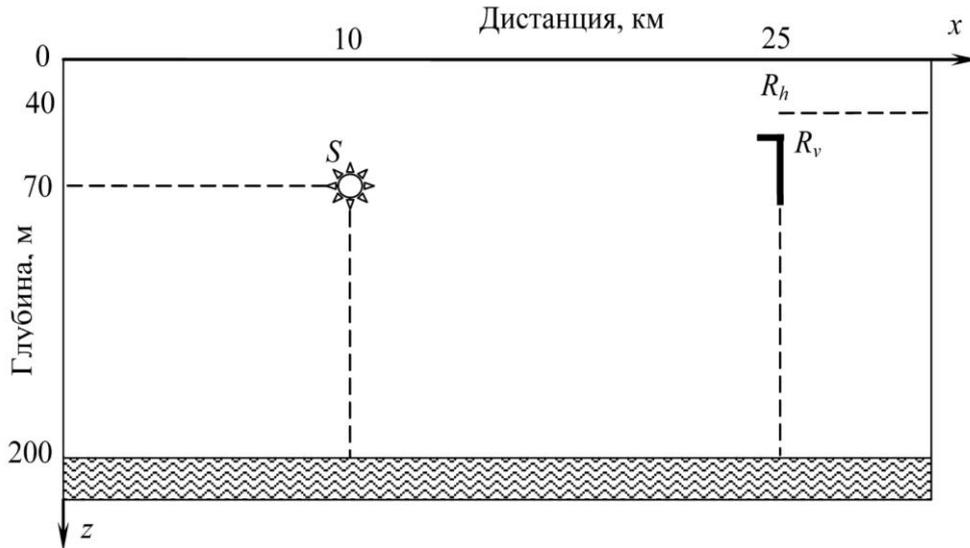


Рис. 2. Геометрия задачи моделирования формирования голограммы акустического поля и его восстановления в детерминированном подводном волноводе.

S — точечный источник звука; R_h — горизонтальная линейная антенная решетка;
 R_v — вертикальная линейная антенная решетка.

Из рис. 3 и 4 следует, что качество изображения источника звука и возможность его локализации в пространстве волновода существенно зависит от числа элементов приемной антенны, на выходах которой формируется голограмма акустического поля. При этом имеет место эффект, известный для оптических голограмм и заключающийся в потере контраста с фоном изображения объекта по мере уменьшения размеров голограммы (области R на рис. 1).

Одновременно следует отметить, что даже для голограммы, формируемой на выходе одиночного элемента антенны, на дистанциях много больших глубины волновода обеспечивается возможность локализации точечного источника звука по его изображению, структура которого близка к структуре изображения, полученного с использованием многоэлементной вертикальной антенны. При этом, как показано на сопровождающих изображениях разрезах поля, локализация источника звука обеспечивается по глубине с точностью ~ 10 м и по дистанции с точностью ~ 200 м.

Согласно работе [19], такое качество изображения объясняется волноводным распространением звука, характеризующимся многократными отражениями волн от поверхности и дна и обеспечивающим восстановление поля источника по данным приемной антенны, включающей реальный приемный элемент в волноводе и «мнимые» приемные элементы, формируемые за границами волновода.

На рис. 3 и 5 показано, что для достижения равной точности локализации источника звука по его изображению, протяженность линейных акустических антенн, на выходах которых формируется голограмма этого поля, должна быть существенно разной по горизонтальной и вертикальной координатам. Этот факт объясняется соответствующим различием масштабов изменения акустического поля в волноводе по горизонтальной и вертикальной координатам.

В связи с тем, что восстановление акустического поля источника звука в пространстве волновода осуществляется на основе расчета передаточной характеристики канала, очевидной представляется чувствительность этого метода к точности используемой информации о неоднородности подводной среды. При этом, как показывают проведенные модельные исследования, наибольшее влияние на эффективность метода оказывают флуктуации скорости звука в неоднородном волноводе.

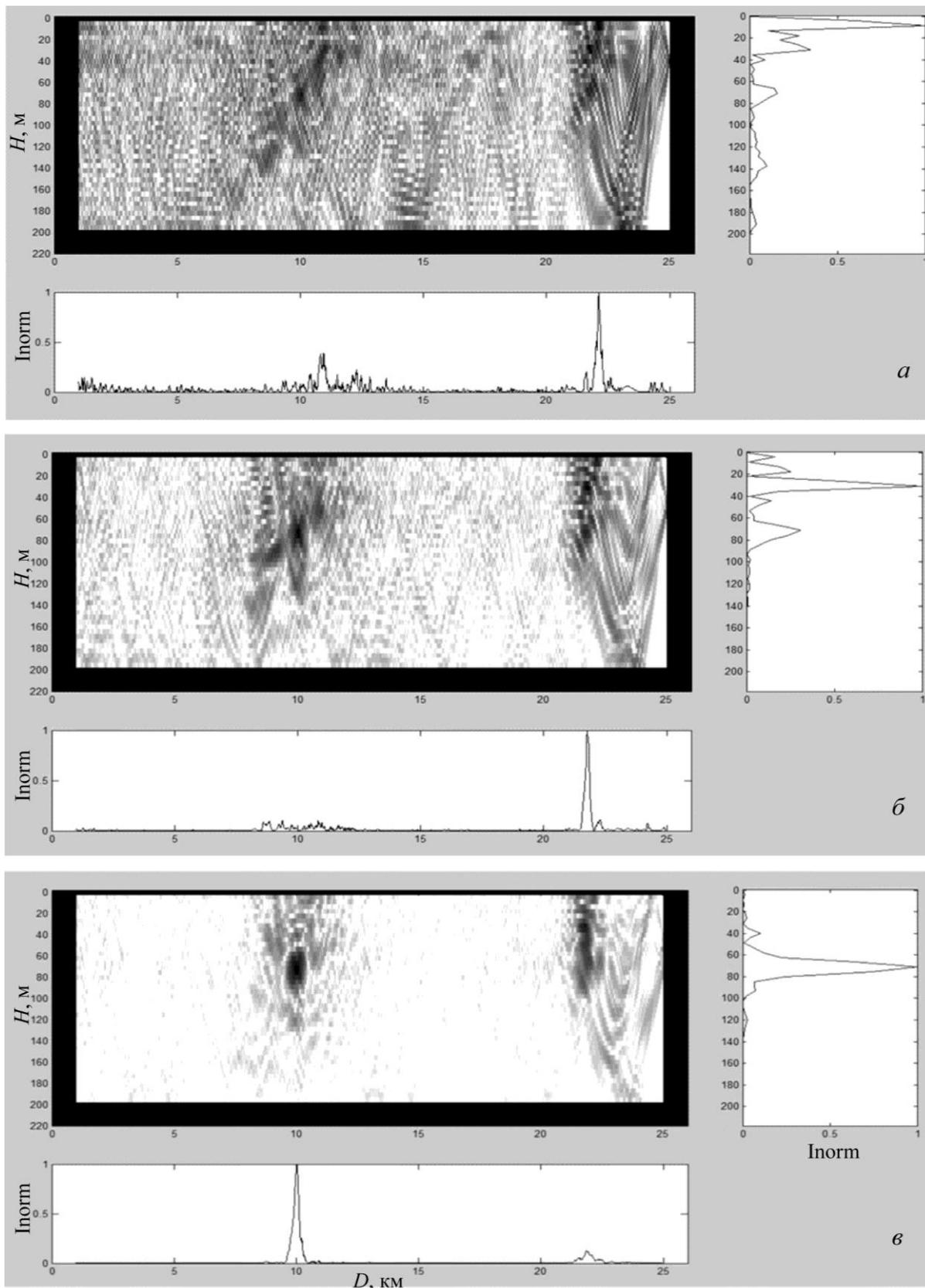


Рис. 3. Изображения распределений в пространстве волновода нормированной (по максимуму) интенсивности (I_{norm}) акустического поля точечного источника звука, восстановленного по голограммам на выходах вертикальных антенн с числом элементов N . $N = 1$ (*a*), 5 (*б*), 10 (*в*) на дистанциях 1...25 км от начала трассы, с разрезами этих распределений по дистанции (D) и глубине (H), проходящими через точку максимального значения интенсивности поля.

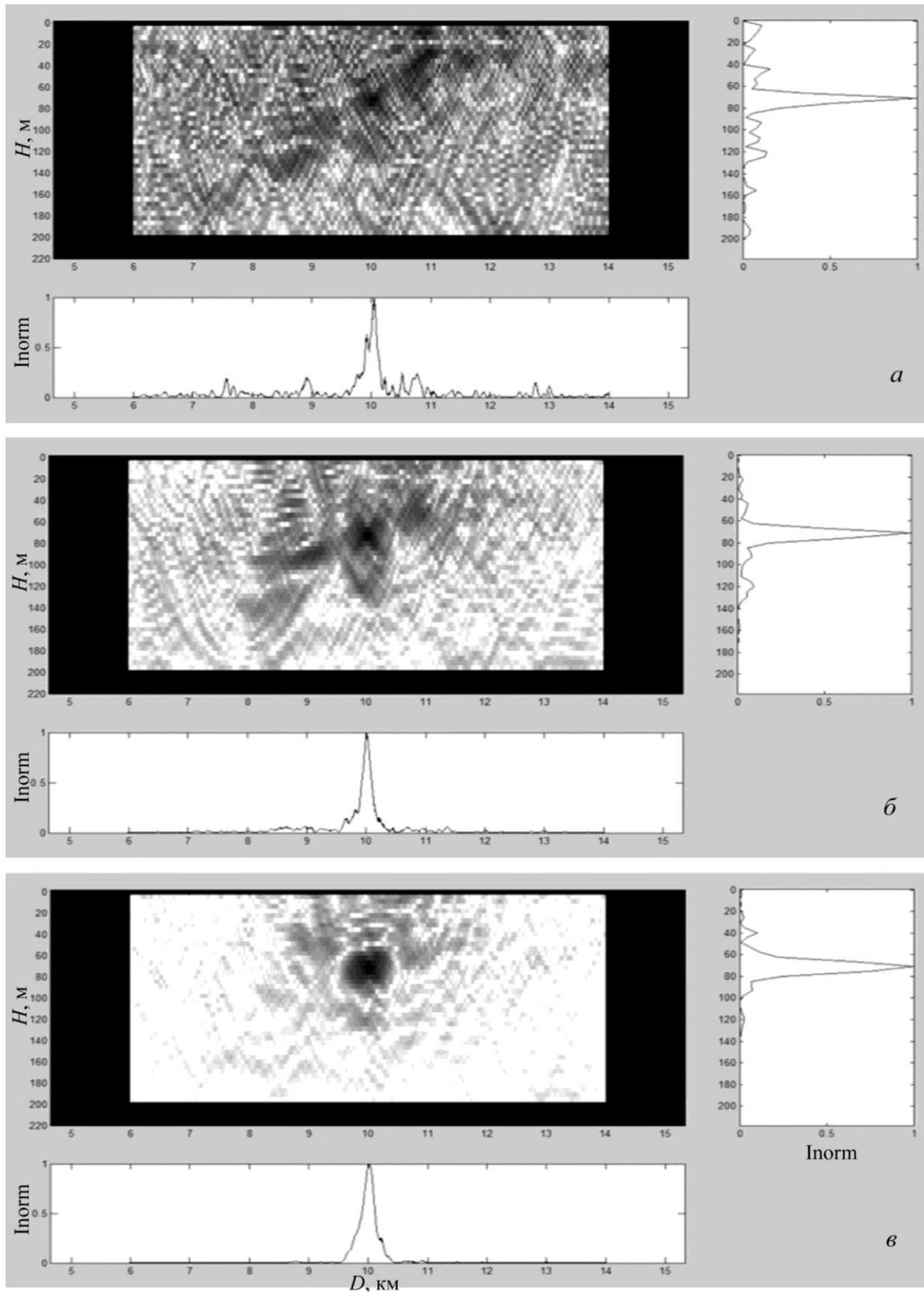


Рис. 4. Изображения распределений в пространстве волновода нормированной (по максимуму) интенсивности (I_{norm}) акустического поля точечного источника звука, восстановленного по голограммам на выходах вертикальных антенн с числом элементов N . $N = 1$ (*a*), 5 (*б*), 10 (*в*) на дистанциях 6...14 км от начала трассы, с разрезами этих распределений по дистанции (D) и глубине (H), проходящими через точку максимального значения интенсивности поля.

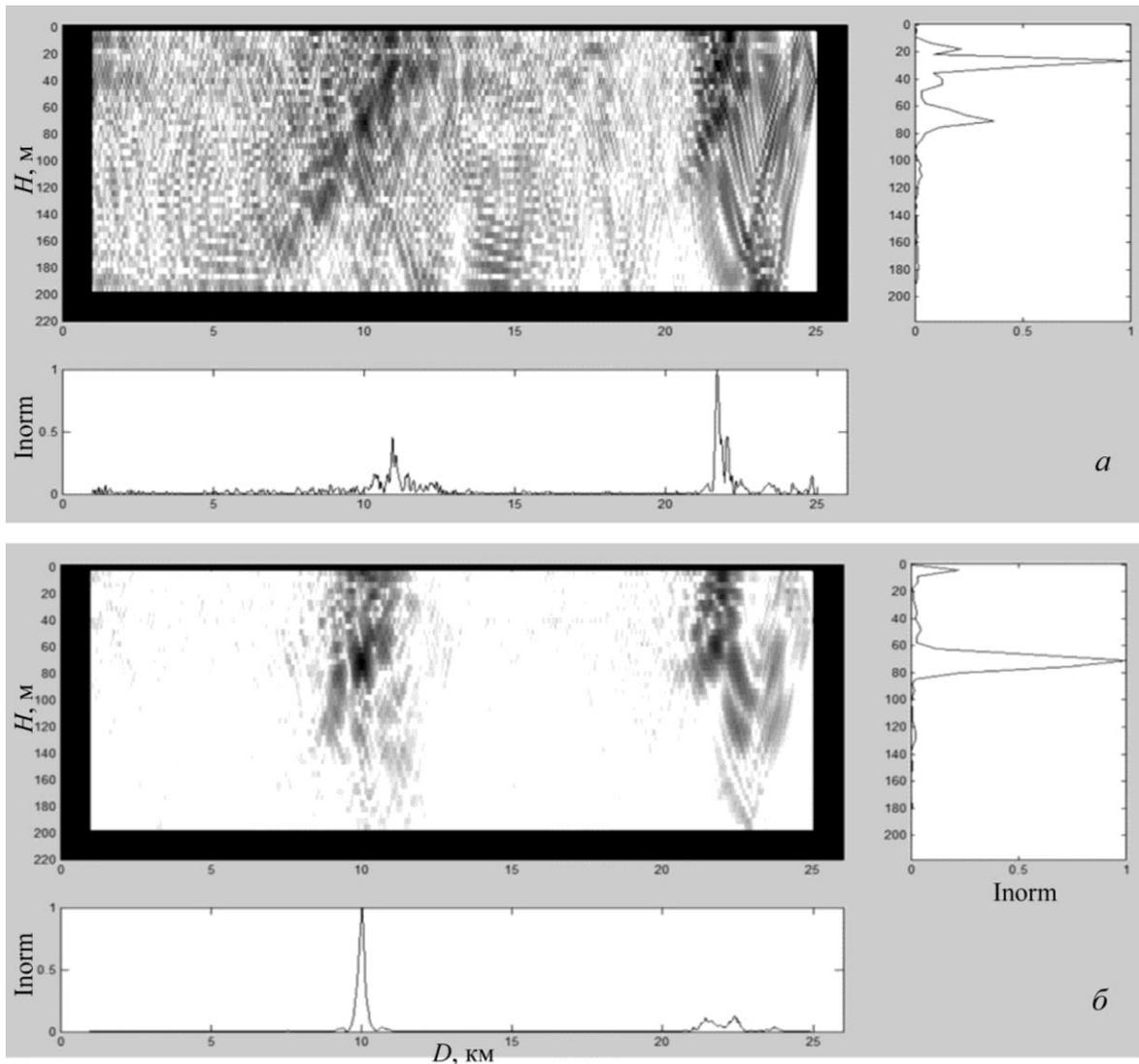


Рис. 5. Изображения распределений в пространстве волновода нормированной (по максимуму) интенсивности (I_{norm}) акустического поля точечного источника звука, восстановленного по голограммам на выходах горизонтальных антенн с числом элементов $N = 10$ и межэлементными расстояниями 7.7 м (а) и 77 м (б), с разрезами этих распределений по дистанции (D) и глубине (H), проходящими через точку максимального значения интенсивности поля.

В работах [25—27] показано, что случайные неоднородности скорости звука в океане определяются динамикой водных масс и, в частности, наличием в подводной среде естественной турбулентности, внутренних волн, циклонических вихрей и течений. Под влиянием различных гидрофизических факторов в подводной среде формируется динамически изменяющаяся тонкая структура вертикального распределения скорости звука, оказывающая существенное влияние на распространение акустических волн.

В ряде работ отмечается, что наибольшее влияние на звуковое поле оказывают короткопериодные внутренние волны, имеющие амплитуды размаха по толще волновода не превышающие 10...20 м и длины волн от сотен метров до километров.

Они распространяются преимущественно в виде отдельных квазисинусоидальных цугов, включающих от единиц до нескольких десятков периодов. Низкочастотные внутренние волны могут иметь амплитуды размаха до сотен метров и длины волн в десятки и сотни километров. Влияние внутренних волн можно рассматривать как соответствующее форме волны изменение скорости звука в толще волновода, обусловленное амплитудой

изменения гидрофизических параметров во внутренней волне. Оценки величины флуктуаций скорости звука, вызванных внутренними волнами, обычно не превышают значения 3—4 м/с [26]. Флуктуации скорости звука, обусловленные наиболее изученной мелкомасштабной турбулентностью, обычно считаются статистически однородными и изотропными, а их амплитуда не превышает значения 3 м/с. При этом масштабы пространственных возмущений составляют 0.1—10 м по глубине и 0.1—100 м по дистанции [26, 27]. Имеются данные о слоях тонкой структуры скорости звука в океане, имеющих масштабы по толщине от единиц до десятков метров и по протяженности до нескольких километров. Оценки величины флуктуаций скорости звука в этих слоях не превышают значения 2 м/с.

В целях получения экспериментальных оценок эффективности визуализации и локализации источника звука в случайно-неоднородном волноводе (в условиях наличия неучтенных при обработке неоднородностей волновода) в рамках настоящей работы было выполнено численное моделирование восстановленного голографическим методом поля источника для упрощенных моделей неоднородной подводной среды. Для вычислительных экспериментов так же, как и для предыдущих исследований с детерминированной подводной средой, был выбран волновод глубиной 200 м с ровным дном и с вертикальным распределением скорости звука, обеспечивающим положительную рефракцию акустических лучей от поверхности до дна. При этом предполагалось, что случайные неоднородности среды проявляются в волноводе с детерминированным вертикальным распределением скорости звука (ВРСЗ). Геометрия задачи моделирования формирования голограммы акустического поля и его восстановления в случайно-неоднородном подводном волноводе показана на рис. 6.

Эксперименты проводились с моделями неоднородностей среды в виде флуктуаций скорости звука в волноводе, обусловленных мелкомасштабной турбулентностью, внутренней волной и тонкой структурой вертикального распределения скорости звука. Голограмма акустического поля определялась на выходе вертикальной линейной антенны с числом элементов $N = 20$ в полосе частот 300...500 Гц.

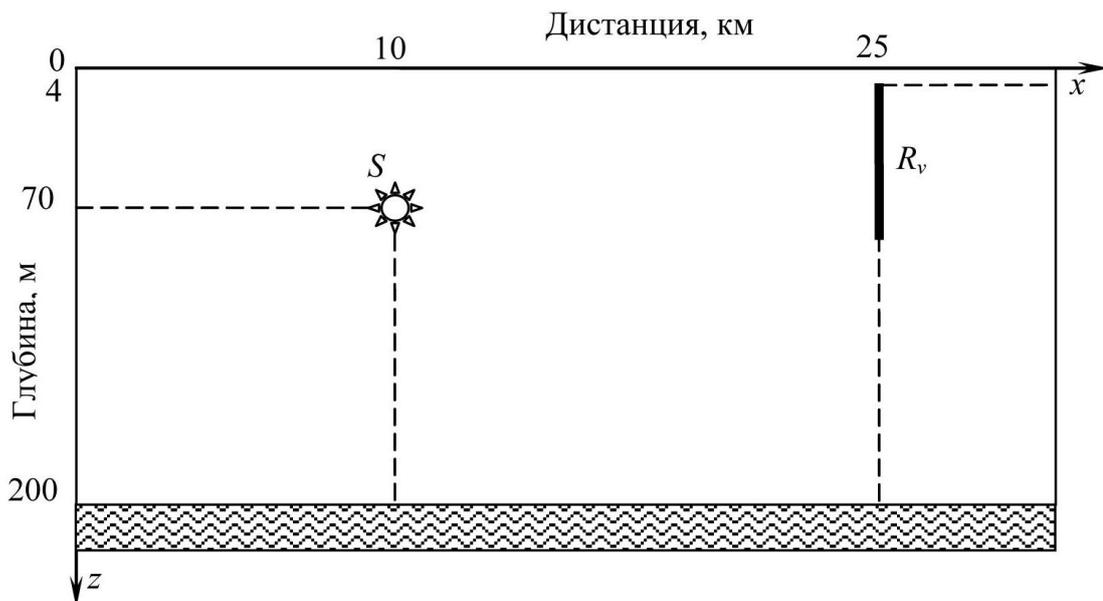


Рис. 6. Геометрия задачи моделирования формирования голограммы акустического поля и его восстановления в случайно-неоднородном подводном волноводе.
 S — точечный источник звука; R_v — вертикальная линейная антенная решетка.

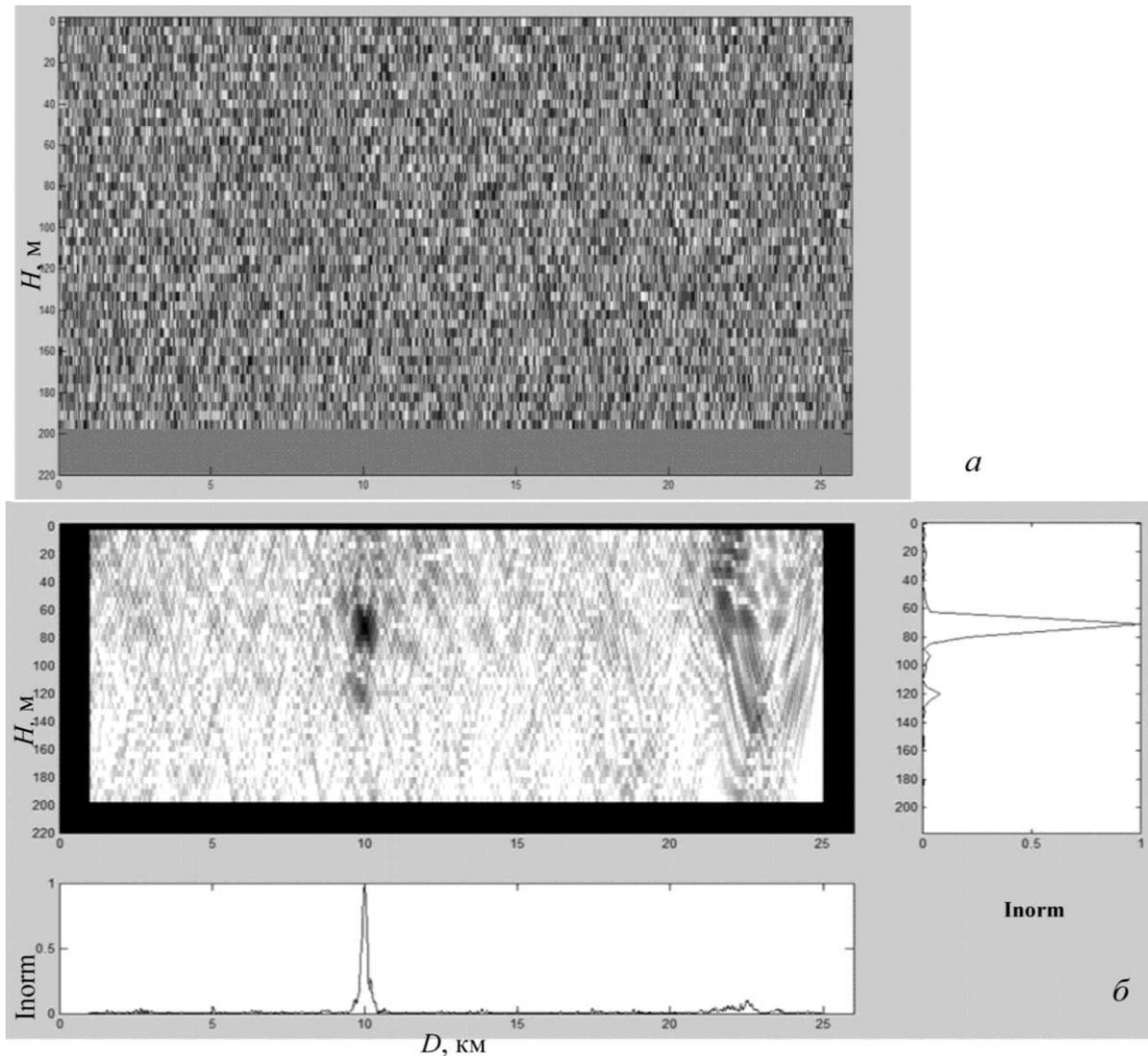


Рис. 7. Изображение распределения в пространстве волновода ошибок оценки скорости звука для модели неоднородной среды с мелкомасштабной турбулентностью (а) и изображение распределения нормированной (по максимуму) интенсивности (I_{norm}) восстановленного акустического поля точечного источника звука с разрезами этого распределения по дистанции (D) и глубине (H), проходящими через точку максимального значения интенсивности поля (б).

Неоднородности среды с мелкомасштабной турбулентностью моделировались в виде случайных ошибок определения скорости звука в узлах расчетной сетки, наложенной на волновод. При этом использовался равномерный закон распределения ошибок на интервале от -3 до 3 м/с. Распределение ошибок для этой модели неоднородного волновода показано на рис. 7, а, где светлый оттенок соответствует положительным значениям, темный — отрицательным. Результат вычислительного эксперимента, представленный на рис. 7, б, показывает практическую независимость эффективности исследуемого метода от рассмотренной модели неоднородной среды.

Неоднородность подводной среды в виде синусоидальной внутренней волны моделировалась по всей глубине волновода на дистанциях $2.5 \dots 22.5$ км от начала трассы в виде ошибок определения скорости звука, соответствующих внутренней волне. При этом ошибки имели регулярное синусоидальное изменение по трассе с амплитудой 4 м/с. Число периодов внутренней волны варьировалось в различных экспериментах с этой моделью среды. В результате экспериментов установлено, что эффективность исследуемого

метода практически не зависит от рассмотренной модели неоднородной среды при заданной протяженности неоднородности при условии, что число периодов внутренней волны не меньше 5. Этот факт не является очевидным и объясняется, по-видимому, взаимной компенсацией искажений волн, распространяющихся через неоднородности волновода, характеризующиеся ошибками оценки скорости звука с разными знаками. Таким образом, влияния неоднородностей на акустическое поле в среде с циклическим знакопеременным изменением параметров вдоль волновода компенсируют друг друга. Распределение ошибок, соответствующих внутренней волне с числом периодов равным 5, и результат вычислительного эксперимента для этой модели волновода показаны на рис. 8.

Модель среды с тонкой структурой вертикального распределения скорости звука реализована путем формирования в пространстве волновода 20 неоднородностей толщиной 5 м и равномерно распределённых в диапазоне глубин 10...180 м. Сами неоднородности при этом моделировались в виде случайных ошибок определения скорости звука с абсолютной величиной 3 м/с и равномерным распределением знака. Начальные дистанции неоднородностей принимались равными 10 м от начала трассы, а протяженности их определялись случайными величинами с равномерным законом распределения в диапазоне 0...25.98 км.

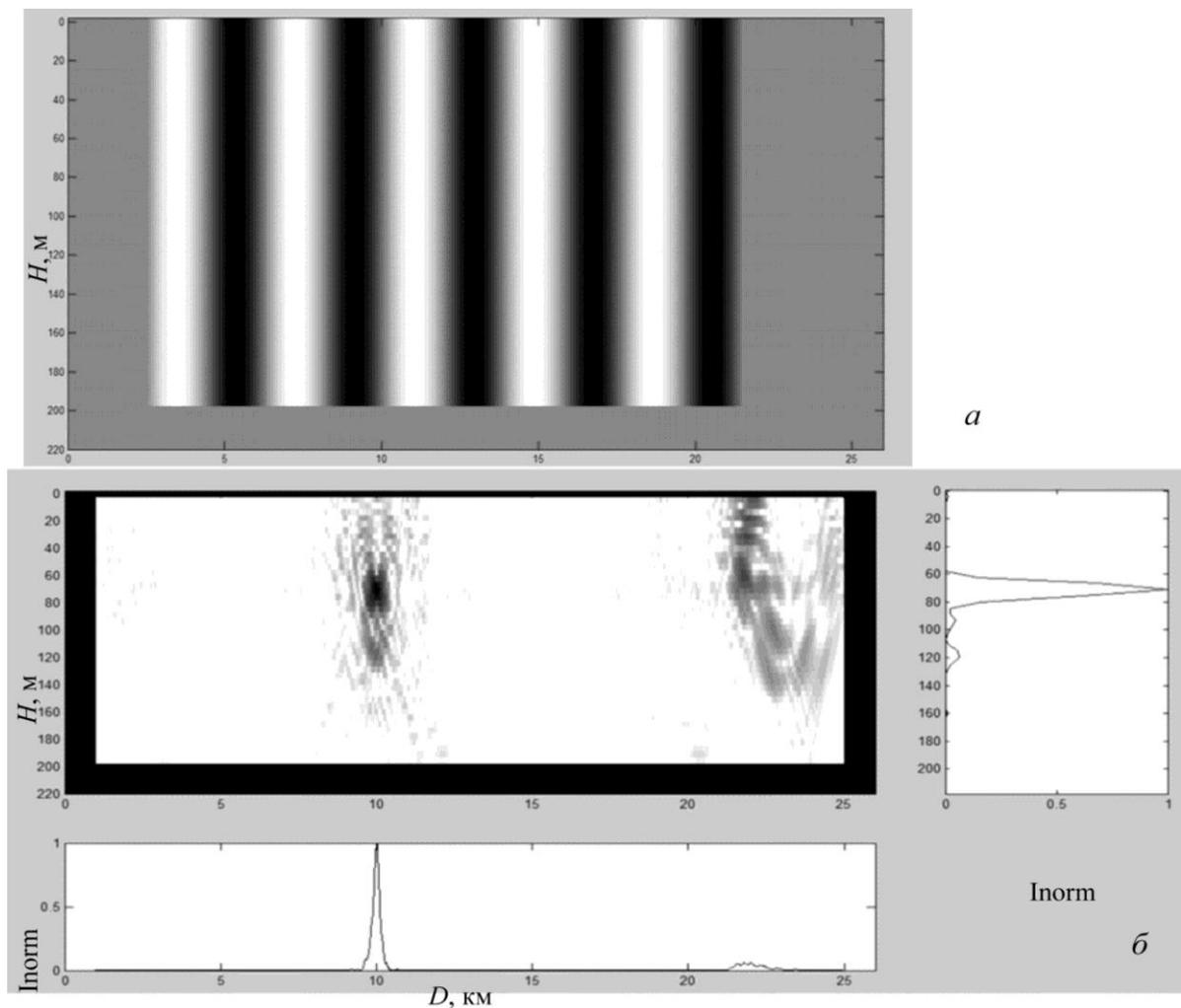


Рис. 8. Изображение распределения в пространстве волновода ошибок оценки скорости звука для модели неоднородной среды с внутренней волной (а) и изображение распределения нормированной (по максимуму) интенсивности (I_{norm}) восстановленного акустического поля точечного источника звука с разрезами этого распределения по дистанции (D) и глубине (H), проходящими через точку максимального значения интенсивности поля (б).

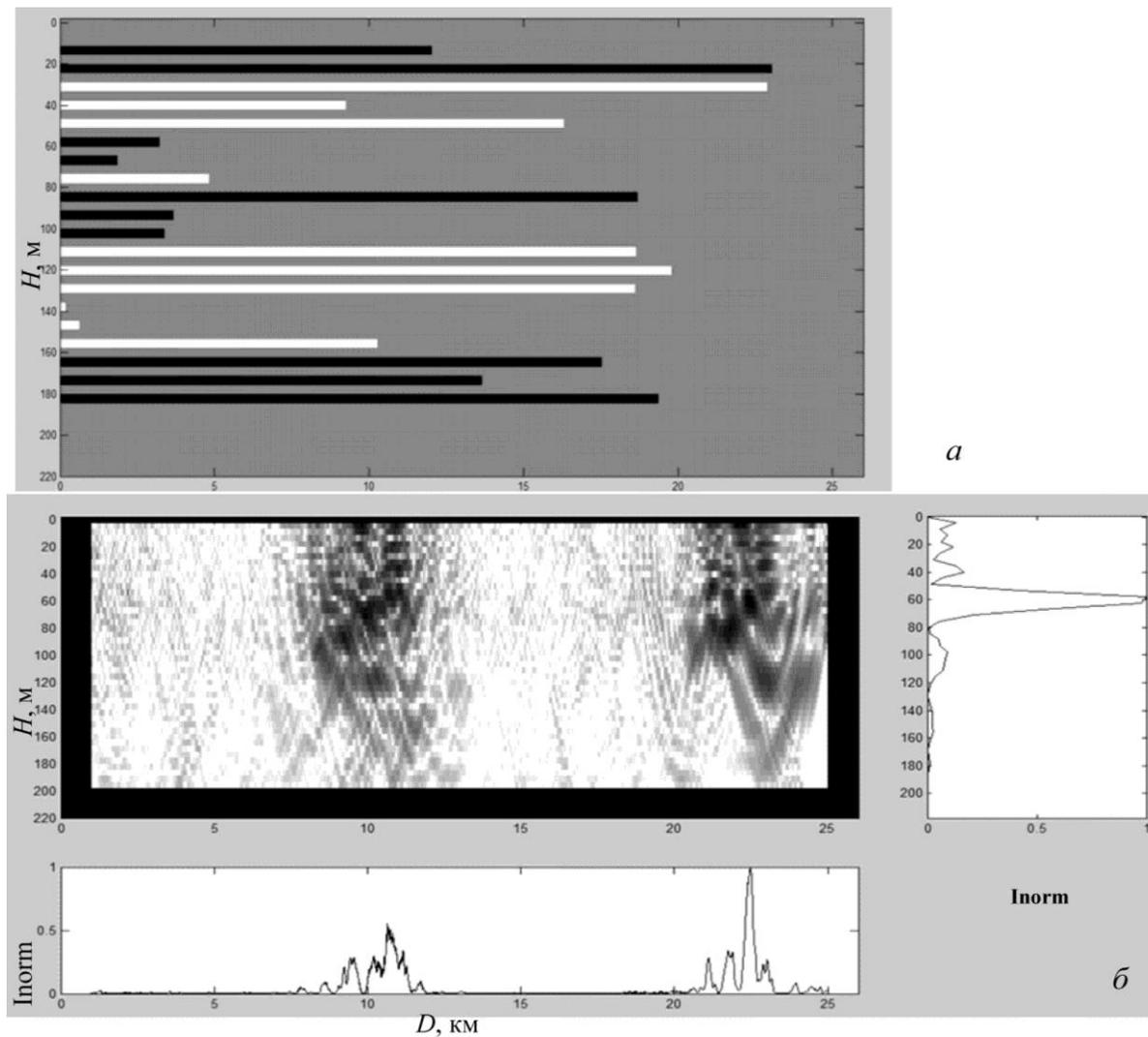


Рис. 9. Изображение распределения в пространстве волновода ошибок оценки скорости звука для модели неоднородной среды с тонкой структурой ВРСЗ (а) и изображение распределения нормированной (по максимуму) интенсивности (I_{norm}) восстановленного акустического поля точечного источника звука с разрезами этого распределения по дистанции (D) и глубине (H), проходящими через точку максимального значения интенсивности поля (б).

Распределение ошибок оценки скорости звука, соответствующих принятой модели неоднородной среды показано на рис. 9, а, где светлый оттенок соответствует положительным значениям, темный — отрицательным.

В результате вычислительного эксперимента (рис. 9, б) установлено, что неоднородности скорости звука, имеющие большую протяженность вдоль волновода, оказывают существенное негативное влияние на эффективность восстановления поля точечного источника звука голографическим методом. Это связано, по-видимому, с эффектом накопления искажений распространяющихся по трассе волн.

Повышение эффективности восстановления поля источника звука в волноводе голографическим методом при модели неоднородной среды с тонкой структурой ВРСЗ может достигаться уточнением ВРСЗ по трассе распространения звука. Измерительная информация, полученная при уточнении ВРСЗ может быть использована для построения на основе процедур линейной интерполяции уточненной модели распределения скорости звука в волноводе. При этом неоднородности подводной среды оказываются частично учтенными при реализации операций голографического восстановления поля. Степень

учета неоднородностей определяется в этом случае величинами шагов измерения скорости звука как вдоль волновода, так и в его поперечном сечении.

Для рассматриваемой трассы протяженностью 25 км шаг уточнения ВРСЗ по дистанции может быть выбран равным 8 км, а по глубине — 1 м. Распределения ошибок определения скорости звука, соответствующих модели неоднородной среды с тонкой структурой ВРСЗ без учета и с учетом уточнения ВРСЗ по трассе распространения звука приведены на рис. 10, *а* и *б*, где светлый оттенок соответствует положительным значениям, темный — отрицательным. При этом ошибки, изображенные на рис. 10, *б* получены путем вычитания из ошибок рис. 10, *а* результата линейной интерполяции этих ошибок между точками измерения скорости звука при уточнении ВРСЗ по трассе распространения акустических волн.

На рис. 10, *в* приводится результат вычислительного эксперимента при уточнении параметров неоднородной среды, соответствующем распределению ошибок оценки скорости звука, показанному на рис. 10, *б*. Полученный результат показывает, что для модели неоднородной среды с тонкой структурой ВРСЗ уточнение скорости звука по трассе распространения волн обеспечивает независимость эффективности исследуемого метода от характера неоднородностей.

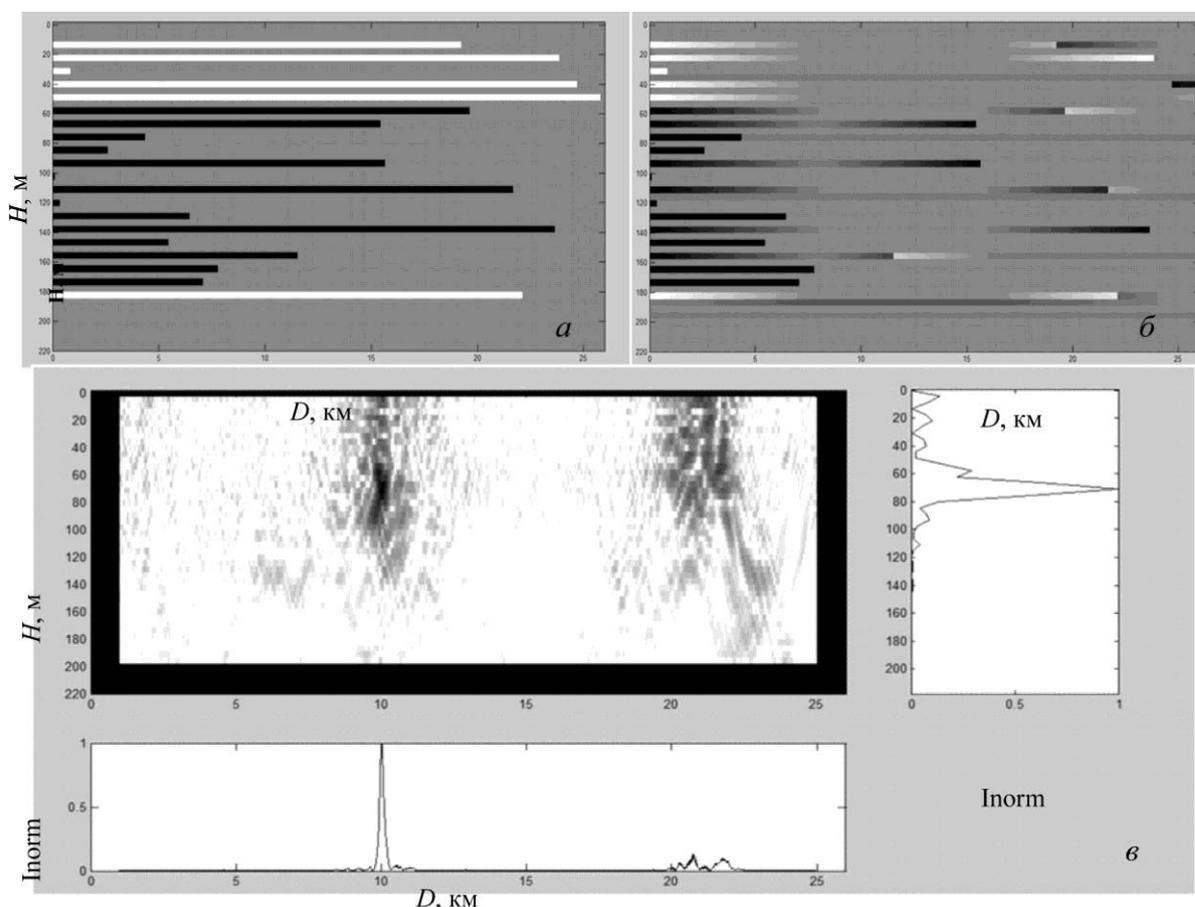


Рис. 10. Изображения распределений в пространстве волновода ошибок оценки скорости звука для модели неоднородной среды с тонкой структурой ВРСЗ без уточнения (*а*) и с уточнением (*б*) параметров среды, а также изображение распределения нормированной (по максимуму) интенсивности ($Inorm$) восстановленного при уточнении параметров неоднородной среды акустического поля точечного источника звука с разрезами этого распределения по дистанции (D) и глубине (H), проходящими через точку максимального значения интенсивности поля (*в*).

Следует заметить, что в случае совмещения моделей неоднородной среды с внутренней волной и с тонкой структурой ВРСЗ к уточнению ВРСЗ по трассе следует подходить с осторожностью. Это связано с тем, что такое уточнение в условиях внутренней волны с достаточно большой амплитудой размаха по толщине волновода и амплитудой изменения гидрофизических параметров в целях исключения возможности искажения модели среды следует выполнять с шагом по дистанции не большим полупериода этой волны. В случае наличия короткопериодных внутренних волн с малыми амплитудами возможностью искажения модели среды при уточнении ВРСЗ по трассе можно пренебречь.

Предложенный метод голографического восстановления акустического поля источника звука, положенный в основу его компьютерной визуализации в пространстве мелко-водного волновода, безусловно, требует проверки в натуральных условиях. Однако даже немногочисленные данные вычислительных экспериментов по моделированию этого метода в условиях ограниченного числа достаточно упрощенных моделей случайно-неоднородного волновода позволяют ожидать положительных результатов этой проверки.

Рассмотренные в работе принципы обработки гидроакустической информации могут быть использованы в дальнейшем как при разработке новых перспективных гидроакустических средств различного назначения (прежде всего, стационарных), так и при модернизации существующих изделий гидроакустической техники для достижения качественных и количественных преимуществ по отношению к существующим.

References

1. Zverev V. A. Radiooptics. *Moscow, Sov.radio*, 1975, 304 p. (in Russian).
2. Zverev V. A. Holography in ocean acoustics. *Ocean acoustics. The modern state. Moscow, Nauka*, 1982, 175—180 (in Russian).
3. Spatial-temporal processing of signals / Edited by I. Kremer. *Moscow, Radio i svjaz*, 1984, 224 p. (in Russian).
4. Zuikova N. V., Svet V. D. Optical-digital recovery method field of the point source in a layered inhomogeneous waveguide. *Akust. Zh.* 1987, 3, 493—497 (in Russian).
5. Svet V. D. Experimental restoration of the sound field of a point source in a waveguide. *Akust. Zh.* 1990, 4, 733—739 (in Russian).
6. Svet V. D., Fedotov D. A. About the restoration of the field of a point source of sound in the surface ocean waveguide. *Akust. Zh.* 1993, 4, 729—734 (in Russian).
7. Zavadsky V. Ju. Calculation of wave fields in open areas and waveguides. *Moscow, Nauka*, 1972, 558 p. (in Russian).
8. Zavadsky V. Ju. Method of grids for waveguides. *Moscow, Nauka*, 1986, 368 p. (in Russian).
9. Zavadsky V. Ju. Modeling of wave processes. *Moscow, Nauka*, 1991, 248 p. (in Russian).
10. Zuikova N. V., Svet V. D. Matched field processing in oceanic waveguides. *Akust. Zh.* 1993, 3, 389—403 (in Russian).
11. Bucker H. P. Use of calculated sound fields and matched-field detection to locate sound in shallow water. *Journal of the Acoustical Society of America*. 1976, 59, 368—373.
12. Baggeroer A. B., Kuperman W. A., Schmidt H. Matched field processing: Source localization in correlated noise as an optimum parameter estimation problem. *Journal of the Acoustical Society of America*. 1988, 83, 571—587.
13. Feuillade G., Del Balso D. R. Environmental mismatch in shallow water matched-field processing: Geoacoustic parameter variability. *Journal of the Acoustical Society of America*. 1989, 85, 2354—2364.
14. Zala C. A., Ozard J. M. Matched field processing for a moving source. *Journal of the Acoustical Society of America*. 1992, 92, 403—417.
15. Tolstoy A. Matched Field Processing for Ocean Acoustics. *New Jersey: World Scientific Publishing Co.*, 1993.
16. Porter M. D., Tolstoy A. The matched field processing benchmark problems. *Journal of Computational Acoustics*. 1994, 3, 161—185.
17. Greening M. V., Zakarauskas P., Dosso S. E. Matched field localization for multiple sources in an uncertain environment with application to arctic ambient noise. *Journal of the Acoustical Society of America*. 1997, 101, 3525—3538.
18. Tollepsen D., Dosso S. E., Wilmut M. J. Matched field geoacoustic inversion with a horizontal array and low-level source. *Journal of the Acoustical Society of America*. 2006, 120, 221—237.
19. Borodina E. L., Mitjugov V. V., Mujakshin S. I., Turko A. N. The reversal of the wave front in an acoustic waveguide. *Akust. Zh.* 2006, 4, 437—447.

20. Laval R., Labasque Y. Computation of averaged sound Propagation losses and Frequency-Space Coherence Functions in Shallow Waters / Bottom-Interacting Ocean Acoustics. *New York, Plenum Press*, 1980, 717 p.
21. Laval R., Labasque Y. Medium Inhomogeneities and Instabilities: Effects on Spatial and Temporal Processing / Underwater Acoustics and Signal Processing. *Copenhagen, Nato Advanced Study Institute*, 1980, 736 p.
22. Jaroslavsky L. P., Merzljakov N. S. Digital holography. *Moscow, Nauka*, 1982, 219 p. (in Russian).
23. Jaroslavsky L. P. Digital signal processing in optics and holography: introduction to digital optics. *Moscow, Radio i svjaz*, 1987, 295 p. (in Russian).
24. Vasilenko G. I., Taratorin A. M. Image restoration. *Moscow, Radio i svjaz*, 1986, 304 p. (in Russian).
25. Physics of the ocean / Edited by V. M. Kamenkovich, A. S. Monin. *Moscow, Nauka*, 1978, 439 p. (in Russian).
26. Sound Transmission Through A Fluctuating Ocean / Edited by S. M. Flatte. *Cambridge University Press, England*, 1979.
27. Doronin Ju. P. Physics of the ocean. *SPb, RGGMU*, 2000, 340 p. (in Russian).

Статья поступила в редакцию 13.11.2013 г.



© D. V. Chirov
 SPIIRAS-HTR&DO Ltd, Saint-Petersburg, Russia
 dch-12@yandex.ru

COMPUTER VISUALIZATION OF THE SOUND SOURCE IN A SHALLOW WAVEGUIDE

The features of practical implementation of the holographic method of the acoustic field recovery in the space of the waveguide, which is the method of the matched field processing, as well as the theoretical basis of the method are considered in the article. The paper shows the relationship of characteristics of restored acoustic field of sound source with the complex transfer function of the waveguide, which is determined on the basis of the solution of the wave equation. A simple recovery source field by applying computational procedures of calculating the transfer characteristics of the waveguide by a finite difference method for the explicit calculation scheme is noted. The results of computational experiments on the study of the effectiveness of the method in the conditions of an inhomogeneous underwater environment are presented. Each numerical experiment consisted of two stages: calculation of the hologram field of a point source of a sound and subsequent recovery of the acoustic field. For computational experiments a shallow waveguide with a flat bottom and with a positive acoustic refraction of the rays from the surface to the bottom was selected. In the paper three simplified models of inhomogeneous underwater environment are considered: with small-scale turbulence, with internal wave, with a layered structure of the vertical distribution of sound velocity. It is shown that the unaccounted in homogeneities of the velocity of sound along the length of the waveguide have a material adverse effect on the efficiency of recovery of the field of a source of a sound by holographic method. This effect can be reduced by clarifying the parameters of the environment along the waveguide.

Key words: computer visualization, shallow waveguide, image source of the sound, the acoustic field, wave equation, finite difference method, hologram.