

УДК 534.34:534.231.1

© Г. Н. Кузнецов¹, А. Н. Степанов²

¹Научный центр волновых исследований Института общей физики им. А. М. Прохорова РАН, г. Москва

²Самарский государственный университет
skbmortex@mail.ru

ИНФРАЗВУКОВЫЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ ПОЛЯ НАПРАВЛЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ В МЕЛКОМ МОРЕ

Выполнено численное исследование интерференционной структуры низкочастотных гидроакустических полей в мелком море, возбуждаемых сосредоточенными направленными источниками сигналов. Исследование выполнено в предположении, что амплитудно-фазовые распределения в вертикальной и горизонтальной плоскости, формируемые в волноводе протяженными объемными реальными источниками, могут быть образованы системой локальных источников в виде суперпозиции сосредоточенных в одной точке монополя и различным образом ориентированных трех диполей и пяти квадруполов. Расчеты выполнены для анализа гидроакустических полей в ближней и дальней зоне, для различных частот, глубин расположения источников и приемников. Установлено, что структура полей на расстояниях менее и более 1–2 глубин волновода существенно различается. Показано, что снижение интенсивности полей, образованных монополем, горизонтальными диполями и горизонтально ориентированными квадрупольями происходит заметно медленнее при увеличении расстояния, чем снижение сигналов от вертикальных диполей или вертикально ориентированных квадруполов. Показано также, что сигналы от источников или принятые приемниками, расположенными на малых глубинах или в придонной области, убывают существенно быстрее, чем интенсивности полей в случае расположения приемников и излучателей вблизи эквивалентной середины волновода. Рекомендуется выполнять измерения характеристик полей от малозумных источников векторно-скалярными приемниками или антеннами в зонах интерференционных максимумов сигналов и в серединной части волновода. Рекомендуется при прогнозе приведенных значений шумности и обработке экспериментальных данных учитывать передаточные функции волновода, полученные в результате акустической калибровки моделей грунта в районе работ.

Ключевые слова: приведенная шумность, инфразвуковые направленные источники, интерференционная структура, влияние глубины расположения источников и приемников, мелкое море.

G. N. Kuznetsov¹, A. N. Stepanov²

¹Wave Research Center, Prokhorov General Physics Institute of RAS, Moscow, Russia

²Samara State University, Russia
skbmortex@mail.ru

INFRASONIC INTERFERENCE FIELD OF THE DIRECTED SOURCES IN SHALLOW SEA

The numerical study of interferential structure of the low-frequency hydroacoustic fields in shallow sea excited by the concentrated directed sources of signals is made. The study is executed with the assumption that the amplitude-phase distributions in the vertical and horizontal plane formed in a wave guide by extended volume real sources can be formed by system of local sources as superposition of a monopole and various image of the focused three dipoles and five quadrupoles concentrated in one point. The calculations are performed for the analysis of hydroacoustic fields in the near- and far-field, for different frequencies and depth of the source and receiver locations. It is found that the structure of the fields at distances of less or more than 1–2 depths of the waveguide is substantially different. It is shown that the intensity decrease of fields generated by a monopole, horizontal dipoles and horizontally oriented quadrupoles goes noticeably slower at the distance increase than the decrease of signals from vertical dipoles or vertically oriented quadrupoles. It is also shown that the signals from the sources or got by a receiver located at shallow depths or bottom area decrease significantly faster than the intensity of the fields in case if the receivers and sources are located close to the equivalent middle of waveguide. It is recommended to measure the characteristics of the fields of low-noise sources by vector-scalar receivers or antennas in the areas of signal interference maxima and in the middle of waveguide. When predicting the given noise values and processing the experimental data it is recommended to take into account the transfer functions of the waveguide, resulting from acoustic calibration of soil models in the study area.

Key words: shallow sea, reduced noise, aimed infrasound sources, interference structure, the influence of the depth of the source and receiver.

Эффективность решения задач обнаружения, пеленгования и оценки приведенной шумности источников шумоизлучения в мелком море определяется для заданной антенны спектрально-корреляционными характеристиками сигналов и помех. Наибольшее влияние оказывает отношение сигнал/помеха и интервалы пространственной и временной корреляции [1]. Обнаружение и оценка параметров узкополосных сигналов производится с учетом интерференции. Интерференция дискретных составляющих существенно влияет на точность оценки приведенной к стандартным условиям шумности. Этим объясняется интерес к анализу указанных характеристик при расположении приемных антенн в зонах интерференционных максимумов. В этих зонах, во-первых, сравнительно длительное время отношение сигнал/помеха может превышать регулярную составляющую на 5–10 дБ [2–4]. Во-вторых, в зонах интерференционных максимумов формируются «гладкие» градиенты фазы, обеспечивающие высокую пространственно-частотную корреляцию. Это позволяет с использованием «эффективной фазовой скорости» [5] и модели «эквивалентной плоской волны» выполнить антенную обработку, то есть суммировать синфазно сигналы от различных приемников антенны с образованием узких характеристик направленности (ХН) [6].

Важным для исследования интерференции сигналов в волноводе является то, что реальные источники обладают сложной амплитудной и фазовой направленностью [1]. Поэтому для аналитического описания их поля рекомендуется использовать суперпозицию мультипольных источников, формирующих в волноводе поле с эквивалентным реальному объемному протяженному источнику распределением амплитуд и фаз звукового давления [7, 8]. Как следствие, необходимо исследовать интерференционные поля не только монополя (МП), но и различным образом ориентированных в пространстве диполей и квадруполь [ДП, КвП]. Причем следует учитывать, что в реальных условиях приемные системы и источники шумовых полей могут располагаться на различных горизонтах и расстояниях, а звуковые поля формируются на различных частотах.

При выполнении теоретического анализа также важно учитывать гидрофизические характеристики акватории, в частности, учитывать и/или исследовать характеристики морского дна [1, 3, 9]. В этом случае верификация модели передаточной функции волновода будет более объективной и точной [10].

Рассмотрим отдельные аспекты поставленной задачи. Для общности анализа не будем разделять поля на регулярную и осциллирующую составляющие — в этом случае они могут анализироваться совместно. При расчетах в развитие [10] выполним анализ возможности применения различных физических моделей передаточной функции волновода. Учтем также свойства грунта и влияние глубины расположения точек излучения и приема.

Поставленная задача представляется актуальной, поскольку учет вариации сигнала в точке приема, обусловленной интерференцией лучей или мод, может существенно повлиять на оценку скрытности [11] и прогноз вероятных характеристик гидроакустических полей в морской среде [12]. Особенно велики вариации уровней сигнала в волноводе в инфразвуковом диапазоне частот [2–4].

Исходные модельные представления и расчетные формулы. Модель направленного точечного мультипольного излучателя с потенциалом звукового поля в неограниченном однородном пространстве записывается в виде [7]:

$$\psi_i(R, \theta, \varphi) = \sum_{n=0}^L \sum_{m=-n}^n C_{nm} h_n^{(1)}(kR) P_n^{|m|}(\cos \theta) e^{im\varphi}, \quad (1)$$

где R, θ, φ — сферическая система координат с центром, совмещенным с излучателем; L — порядок мультипольности модели; C_{nm} — комплексные мультипольные моменты, описывающие направленные свойства излучателя; $h_n^{(1)}$ — сферические функции Бесселя третьего рода порядка n ; $k = \omega/c_0$ — волновое число; ω — частота источника звука; c_0 — скорость звука в среде; $P_n^{|m|}$ — присоединенные полиномы Лежандра. Далее с учетом (1) используются различные модели и расчетные соотношения. Приведем их без вывода.

Поле полного потенциала мультипольного источника в волноводе Пекериса записывается в виде [7]:

$$\psi(R, \theta, \varphi) = \sum_{n=0}^L \sum_{m=-n}^n D_{nm} e^{im\varphi} \int_{-\pi/2-i\infty}^{\pi/2+i\infty} H_m^{(1)}(u) P_n^{|m|}(\cos\beta) F(\beta) \sin\beta d\beta,$$

где $D_{nm} = C_{nm} \exp(i(m-n)/2)/2$; i — мнимая единица, $H_m^{(1)}$ — функция Ханкеля первого рода порядка m ; $u = kR \sin\beta$,

$$F(\beta) = \begin{cases} \frac{(\chi_{nm} e^{-b(h-z_0)} + V(\beta) e^{b(h-z_0)})(e^{-b(z+z_0)} - e^{b(z+z_0)})}{e^{-bh} + V_1(\beta) e^{bh}}, & -z_0 \leq z \leq 0 \\ \frac{(e^{-bz_0} - \chi_{nm} e^{bz_0})(e^{bz-b(h-z_0)} + V(\beta) e^{-bz+b(h-z_0)})}{e^{-bh} + V_1(\beta) e^{bh}}, & 0 \leq z \leq h-z_0 \end{cases},$$

$b = ik \cos\beta$; $\chi_{nm} = (-1)^{n+|m|}$; $V(\beta) = (\tilde{m} \cos\beta - \sqrt{\tilde{n}^2 - \sin^2\beta})(\tilde{m} \cos\beta + \sqrt{\tilde{n}^2 - \sin^2\beta})$ — коэффициент отражения дна волновода; $\tilde{m} = \rho_1 / \rho_0$, ρ_0 — плотность среды в волноводе, ρ_1 — плотность среды в подстилающем полупространстве; $\tilde{n} = n_0(1 + i\beta)$, $n_0 = c_0/c_1 < 1$, c_1 — скорость звука в подстилающем полупространстве; $\beta \geq 0$ — коэффициент поглощения звука в грунте, h — толщина волновода.

Выражение для потенциала поля мультиполя в виде суммы нормальных волн в волноводе Пекериса представлено в [8]:

$$\psi(R, \theta, \varphi) = \frac{4\pi}{kh} \sum_{l=1}^{\infty} \sum_{n=0}^L \sum_{m=-n}^n A_{nml} H_m^{(1)}(\xi_l r) e^{im\varphi},$$

где A_{nml} — коэффициенты возбуждения нормальных волн, $A_{nml} = \frac{\mu_{nm} D_{nm} x_l \sin \alpha_{l0} \sin \alpha_l P_n^{|m|}(x_l / kh)}{\sin^2 x_l \operatorname{tg} x_l / \tilde{m}^2 + \sin x_l \cos x_l - x_l}$,

$\mu_{nm} = \exp(i\pi(1 - \chi_{nm})/4)$, x_l — корни дисперсионного уравнения $\operatorname{ctg} x = i\sqrt{x^2 - (khv)^2} / \tilde{m}x$, $v^2 = 1 - \tilde{n}^2$, $\alpha_{l0} = \frac{\pi}{4}(1 - \chi_{nm}) + x_l \frac{z_0}{h}$, $\alpha_l = x_l \frac{z}{h}$, ξ_l — горизонтальные волновые числа.

Расчеты поля мультипольного излучателя в волноводе Пекериса с использованием метода перевала выполним согласно соотношению [8]:

$$\psi(R, \theta, \varphi) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=-n}^n C_{nm} (-1)^{n+1} e^{im\varphi} \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{j=1}^4 \chi_{nmj} \frac{e^{ikr_{lj}}}{kr_{lj}} \left(F_1(\theta_{lj}) - \frac{iF_2(\theta_{lj})}{2kr_{lj}} \right),$$

где $r_j^2 = r^2 + z_j^2$, $l = 0, 1, \dots$; $j = 1 \div 4$, $r = R \sin\theta$ — горизонтальное расстояние между источником и точкой приема; $z_{l1} = z - 2lh$, $z_{l2} = z + 2z_0 - 2(l+1)h$, $z_{l3} = z + 2z_0 + 2lh$, $z_{l4} = z + 2(l+1)h$, $\cos\theta_{lj} = z_{lj} / z_{lj}$, $F_1(\theta_{lj}) = (-1)^{L_{2j}} P_n^{|m|}(\cos\theta_{lj}) V^{L_{1j}}(\theta_{lj})$, $\chi_{nmj} = 1$ для $j = 1$ и 4 , $\chi_{nmj} = (-1)^{n+|m|}$ для $j = 2$ и 3 ; $L_{1j} = 1$ для $j = 1$ и 3 , $L_{1j} = l+1$ для $j = 2$ и 4 ; $L_{2j} = 1$ для $j = 1$ и 2 , $L_{2j} = l+1$ для $j = 3$ и 4 , а $F_2(\theta_{lj}) = F_1''(\theta_{lj}) + F_1'(\theta_{lj}) \operatorname{ctg}(\theta_{lj}) + \tilde{m}^2 / \sin^2\theta_{lj} F_1(\theta_{lj})$.

Расчеты с использованием метода контурного интегрирования выполним с использованием соотношения [9]:

$$\psi(R, \theta, \varphi) = \psi_i(R, \theta, \varphi) - \hat{\psi}_i(R, \theta, \varphi) + \sum_{n=0}^L \sum_{m=-n}^n C_{nm} e^{i\pi(m-n)/2} \int_0^{\pi/2-i\infty} J_m(kR \sin\beta) P_n^{|m|}(\cos\beta) \hat{F}(\beta) d\beta,$$

где $\psi_n(R, \theta, \varphi)$ — потенциал поля в неограниченном пространстве, определяемый соотношением (1); $\hat{\psi}_i(R, \theta, \varphi) = \sum_{n=0}^L \sum_{m=-n}^n \chi_{nm} C_{nm} e^{im\varphi} h_n^{(1)}(kR') P_n^{|m|}(\cos\theta')$ — слагаемое, описывающее вклад в поле от абсолютно мягкой верхней границы волновода Пекериса; $R' = \sqrt{R^2 + 4Rz_0 \cos\theta + 4z_0^2}$; $\cos\theta' = (R \cos\theta + 2z_0) / R'$; J_m — функции Ханкеля первого рода, порядка m ; $\hat{F}(\beta) = 4V(\beta) e^{2bh} / (1 + V(\beta) e^{2bh}) \operatorname{sh}b(z+z_0) f_1$; $f_1 = \operatorname{sh}bz_0$ — для $n + |m|$ четных и $f_1 = \operatorname{ch}bz_0$ — для $n + |m|$ нечетных. Этот метод использует прямые численные методы вычисления интегралов, что обеспечивает их определение с любой наперед заданной точностью. В приведенных ниже примерах интегралы вычислялись с относительной точностью $1 \cdot 10^{-4}$, в то время как методы перевала и нормальных волн имеют неконтролируемую погрешность, которую можно оценить только приблизительно.

Выбор метода расчета звукового потенциала в ближней зоне. Для расчета звукового поля в дальней зоне в настоящее время разработаны различные алгоритмы и программы, основанные на использовании модового, лучевого, параболического и иных методов и приближений. Выбор метода для расчета поля в ближней зоне, как нам представляется, в каждом частном случае требует дополнительного рассмотрения. Необходимость исследования такой задачи обусловлена тем, что, например, при оценке приведенной шумности реальных источников для пересчета в точку излучения часто используются экспериментальные данные, полученные на малых расстояниях, например, на 50–200 м, или на расстояниях до 500–1000 м [1].

Для выбора расчетной модели ниже выполняется сравнение интерференционных зависимостей амплитуды потенциала (АП) звуковых волн $|\psi(r)|$, вычисленных методом контурного интегрирования, имеющим контролируемую точность, и двумя приближенными — методом перевала и методом нормальных волн. Расчеты выполнены для волновода с глубиной $h = 200$ м и скоростью звука в воде $c_0 = 1500$ м/с. Параметры грунта (жидкого дна) $n_0 = c_0/c_1 = 0.83$, $m = \rho_1/\rho_2 = 2.7$, а коэффициент затухания звука $\beta = 0.01$. Глубины приемника и излучателя 100 м. Расстояния r в большинстве вариантов изменялись от 30 до 1000 м.

Из рис. 1, а следует, что на низкой частоте 30 Гц результаты расчетов по методу перевала хорошо согласуются с точным решением уже на расстоянии 60 м, а метод нормальных волн из-за задержки формирования мод дает согласие огибающих, начиная с $r \sim 200$ м, т. е. $r \sim h$. На более высоких частотах (рис. 1, б, 200 Гц) методы перевала и нормальных волн дают сходственные зависимости, начиная с расстояний $r \sim 30$ –40 м. Поэтому все дальнейшие расчеты выполнены с использованием метода перевала. Однако ряд зависимостей для контроля вычислен также методами контурного интегрирования и нормальных волн. Результаты при $r \geq h$ практически совпадают.

Далее исследуется интерференция поля мультиполей в волноводе, характеристики которого приведены выше. Определялись амплитуды и фазы гармонических сигналов на частотах $f = 10$, 50 и 200 Гц. Глубины расположения источника $z_0 = 5$, 20, 100 и 195 м. Расчеты полей источников, расположенных на малых глубинах, необходимы в связи с актуальностью оценки шумности гражданских судов [13].

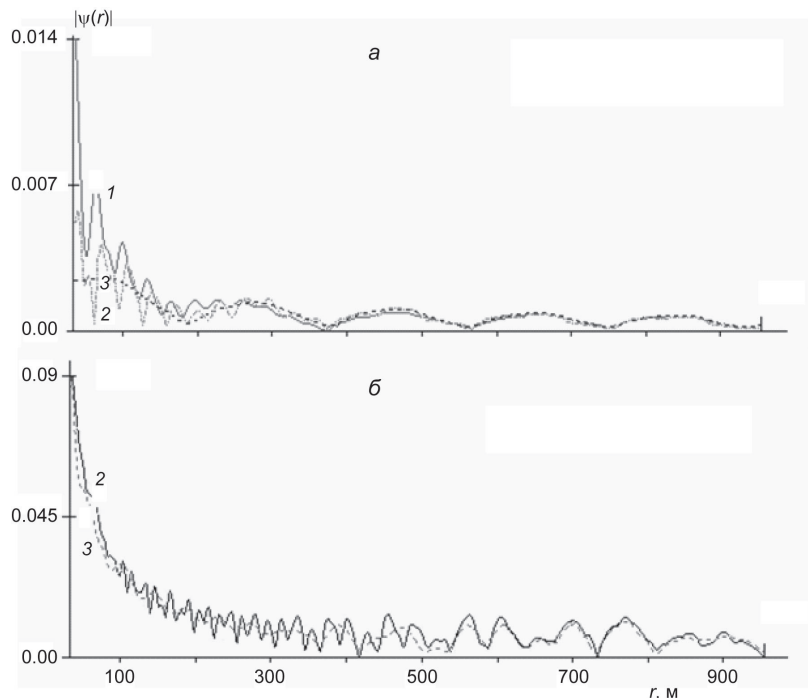


Рис. 1. Зависимость амплитуды потенциала звуковой волны от расстояния, $z_0 = z = 100$ м.
а — $f = 30$ Гц, излучатель — монополь; б — $f = 200$ Гц, излучатель — Y-диполь;
1 — контурное интегрирование, 2 — метод перевала, 3 — нормальные волны.

Численное исследование пространственной структуры поля инфразвуковых мультиполей. Для сравнения полей мультиполей различных порядков должны быть заданы их мультипольные моменты. При анализе зависимости амплитуды потенциалов от расстояния, горизонтов излучения и приема и частоты звука значения мультипольных моментов выбраны так, чтобы значения амплитуд полей были примерно равными в зонах первого максимума при глубине расположения источников 5 м на частоте 10 Гц. Вещественные значения мультипольных моментов для расчетов представлены в табл. 1. Расчеты для x -диполя, xz - и xy -квадруполь не выполнялись, так как в принятой системе координат и рассмотренном направлении сигналы этих мультиполей равны нулю.

При анализе влияния траверзного расстояния и глубины приемного элемента все мультипольные моменты приняты равными.

Анализ зависимости амплитуды потенциалов от расстояния, горизонтов излучения и приема и частоты звука. На основе табл. 1 выполнены расчеты для $f = 50$ Гц и $z_0 = 20, 100$ и 195 м. Зависимости амплитуды потенциала от горизонтального расстояния r представлены на рис. 2.

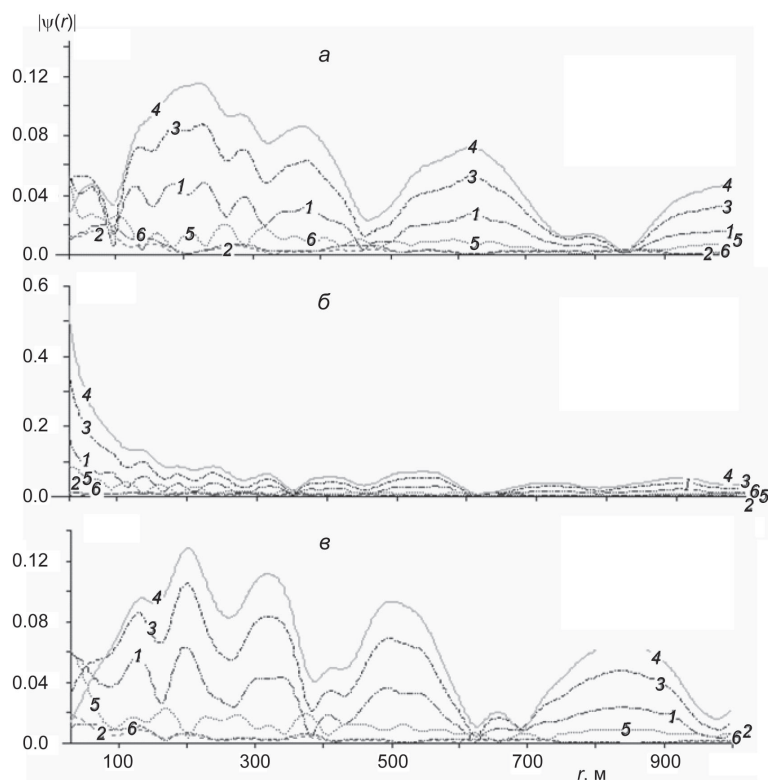
Первое, что можно отметить, анализируя рис. 2 — это существенное отличие характера интерференции для $z_0 = z = H/2$ и для $z_0 = 20$ или 195 м.

На рис. 2, *а* и *в* видно, что при расположении источника у свободной поверхности или у дна наблюдается качественно близкая интерференционная картина, которая, как нам представляется, определяется тремя факторами: влиянием изменения ориентации в пространстве ХН мультиполей относительно координат перемещающегося по горизонтали приемника; влиянием дипольного эффекта и влиянием увеличения расстояния между приемником и источником.

Таблица 1

Значения мультипольных моментов

Монополь	z -диполь	y -диполь	xx - yy -квадруполь	zz -квадруполь	yz -квадруполь
1.055	0.242	2.271	1.13	1.233	0.174

Рис. 2. Зависимость амплитуды потенциала звуковой волны от расстояния, $f = 50$ Гц, $z = 100$ м.

а — $z_0 = 20$ м; *б* — $z_0 = 100$ м; *в* — $z_0 = 195$ м.

1 — монополь; 2 — z -диполь; 3 — y -диполь; 4 — xx - yy -квадруполь; 5 — zz -квадруполь; 6 — yz -квадруполь.

Можно выделить две зоны. Первая, в которой для низких частот нормальные волны еще не сформировались ($r < 0.5-1.0h$), и вторая ($r > h$), где интерференция определяется взаимодействием когерентных мод. На рис. 2, *а* и *в* эти зоны разделяются.

В ближней зоне для вертикальных ДП и КвП при горизонтальном расстоянии $r = 0$, но различных глубинах приемника и источника, сигналы, принятые по прямому лучу, имеют максимальную величину по причине вертикальной ориентации ХН этих источников. При удалении приемник, расположенный на глубине $z = 100$ м, выходит из зоны максимума ХН, и величина сигнала убывает, в том числе вследствие увеличения расстояния. Но проявляется и дипольный эффект — в ближней зоне для этих глубин z_0 на приемник, кроме прямого, приходят лучи, отраженные в противофазе от свободной поверхности (рис. 2, *а*) или от эффективного дна, расположенного на глубине $H = h + \Delta h$ (рис. 2, *в*). Как следствие, возникает интерференция и убывание величины суммарного сигнала.

Во второй зоне при $r > h$ влияние вертикально ориентированной ХН ДП или КвП уменьшается, приходят сигналы, отраженные с противоположной стороны волновода. Поэтому число значимых лучей возрастает и формируется стандартная модовая интерференционная структура поля. Этот эффект при $r > h$ проявляется для всех мультиполей.

Для МП и горизонтально ориентированных ДП и КвП наблюдается иная картина. Но также можно выделить ближнюю — $r < 0.5h - 1.0h$ и дальнюю зону — $r > h$. В ближней зоне сигнал от монополя из-за интерференции, обусловленной дипольным эффектом, спадает не монотонно. Сигналы от горизонтальных ДП и КвП также испытывают влияние дипольного эффекта. Это подтверждается тем, что для мультиполей трех разных типов — МП, y -ДП и xx - yy -КвП зоны расположения минимумов и максимумов совпадают. То есть при удалении приемника источники типа МП, y -ДП и КвП с горизонтальными осями xx и yy формируют в волноводе качественно идентичную интерференционную структуру поля.

Но дипольный эффект для горизонтально ориентированных ДП и КвП, направленных в вертикальной плоскости, проявляется в меньшей степени, поскольку на малых расстояниях их сигналы слабо взаимодействуют с поверхностями раздела, и интерференция формируется, в основном, на расстояниях $r > h$, где уже сформировались моды. В дальней зоне их сигналы также затухают медленнее, поскольку горизонтальные ДП и КвП возбуждают, в основном, моды первых номеров. Отметим, что энергия МП расходуется на возбуждение, в том числе, мод высоких номеров, которые затухают быстрее.

Однако для горизонтальных ДП и КвП проявляется направленность в вертикальной плоскости. Как следствие, при расположении приемника на одной вертикали с источником ($r = 0$) сигналы от них имеют минимальные величины. При увеличении r приемник «входит» в зону максимальных значений ХН, и сигнал возрастает, несмотря на увеличение расстояния.

Из рис. 2, *б* следует, что в случае расположения приемной системы и источника на одном горизонте при заданной дальности наблюдаются максимальные уровни сигналов, что соответствует выводам, полученным в [14, 15], подтверждается экспериментальными и теоретическими результатами [16, 17], а также расчетами на других частотах.

На рис. 3 представлены зависимости $|\psi(r)|$ от расстояния также для $z_0 = z = 100$ м, но для частот $f = 10$ и 200 Гц. Видно, что сигналы от горизонтально ориентированных источников, принимаемые приемником на том же горизонте (y -ДП и xx - yy -КвП), являются наибольшими и превышают сигналы от остальных мультиполей.

Из рис. 2, 3 также следует, что сигналы от ДП или КвП с вертикально ориентированными осями убывают с увеличением расстояния быстрее, чем сигналы от остальных мультиполей. Поэтому в дальней зоне их вкладом в общее поле можно пренебречь. Однако в ближнем поле, в связи с известными прикладными задачами, например, оценкой направленности реальных источников в вертикальной плоскости и приведенной шумности, их учет является обязательным.

Эти выводы становятся особенно наглядными, если рассмотреть интерференционные кривые, нормированные на максимальные величины сигналов. На рис. 4 изображены нормированные зависимости для $f = 50$ Гц, $z_0 = 195$ м. Видно, что уже при $r = 200$ м от источника сигналы вертикально ориентированных z -ДП и zz -, yz -КвП (кривые 2, 5 и 6) уменьшаются в несколько раз.

Как уже отмечалось выше, для z -ДП и КвП с вертикальными осями на малых по горизонтали расстояниях приемник находится в зоне главных максимумов этих источников. И при горизонтальном

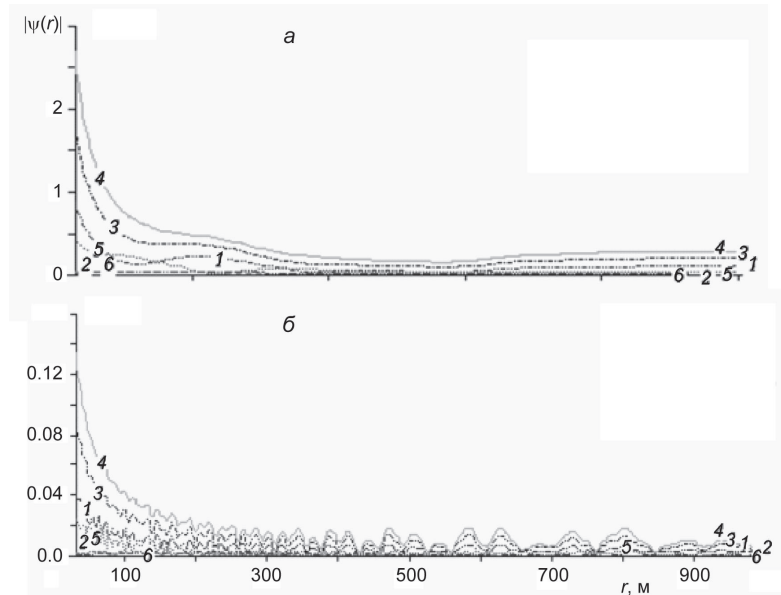


Рис. 3. Зависимость амплитуды потенциала звуковой волны от расстояния, $z_0 = z = 100$ м.
а — $f = 10$ Гц; б — $f = 200$ Гц. Обозначения см. на рис. 2.

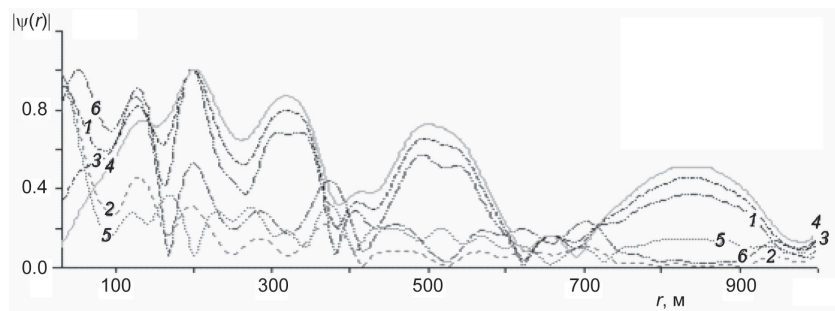


Рис. 4. Зависимость от расстояния нормированной амплитуды потенциала звуковой волны,
 $f = 50$ Гц, $z_0 = 195$ м, $z = 100$ м.
Обозначения см. на рис. 2.

удалении приемник выходит в зону бокового поля, и сигналы быстро убывают (кривые 2, 5, 6). Кроме того, проявляется дипольный эффект — в данном случае из-за близости излучателя к нижней границе идеального волновода, расположенной на эквивалентной глубине H , при условии, что $h - z_0 \ll h$. На больших расстояниях вертикально ориентированные ДП и КвП плохо возбуждают моды первых номеров, что уменьшает величину их сигналов в дальнем поле.

Для у-ДП и КвП с горизонтально ориентированными осями наблюдается обратная картина: для $z_0 = 195$ м при увеличении расстояния по горизонтали приемник ($z = 100$ м) попадает в зону главных максимумов ХН только на $r > 100\text{--}120$ м (кривые 3, 4). И величина сигналов в зоне до $r \sim 1.5h$ монотонно увеличивается, несмотря на удаление приемника от излучателя. Затем формируется модовая структура, и все сигналы с увеличением расстояния убывают.

Анализ влияния поперечного расстояния и глубины приемного элемента. Кроме удаления и приближения реальных источников по радиальному направлению типичным является их движение вблизи приемной антенны с различным поперечным расстоянием. В связи с этим рассчитаны зависимости амплитуды тонального сигнала от мультиполей в точках приема, расположенных на разных глубинах при вариации поперечного расстояния. Скорость звука в воде принята равной 1500 м/с, параметры дна в предположении замены грунта жидким полупространством равны $n_0 = 0.57$, $\tilde{m} = 2.2$; $\beta = 0.03$, глубина волновода $h = 300$ м. Монохроматический излучатель акустических колебаний с $f = 15$ Гц перемещался горизонтально и прямолинейно с поперечным расстоянием 100 м и $z_0 = 40$ м на общей апертуре $L = 3000$ м. Моменты мультиполей при дальнейших расчетах приняты равными.

На рис. 5 представлены амплитуды синтезированного поля монополя и сечения поля смешанного xz -КвП, рассчитанные для $z = 5, 10, 20, 30, 40$ и 50 м. Аналогичные расчеты выполнены и для остальных типов мультиполей, а также для произвольного точечного излучателя, содержащего некоторую заданную комбинацию мультиполей.

Общий вывод — зависимости АП существенно различаются для разных z и ориентаций ХН. Но для всех типов мультиполей характерно, что величина сигналов на приемниках, расположенных на малой глубине, в 5–10 раз меньше, чем сигналы от заглубленных приемников. Важно, что такое соотношение сохраняется и при увеличении расстояния. Причина таких зависимостей очевидна — дипольный эффект. В работах [14, 15] на качественном уровне предсказывается именно такой характер зависимостей. Данный результат важен для прогноза шумности гражданских судов [13] и подводных объектов [1].

Видно также, что проявляется различие основных характеристик мультиполей, например, при заданной ориентации в траверзном положении излучателя может наблюдаться как максимум, так и минимум — в зависимости от свойств ХН в горизонтальной плоскости.

На рис. 6 приведены результаты расчетов АП для МП, z -ДП и xz -КвП с равными по величине моментами, но для различных траверзных расстояний — 100, 300, 1000 и 3000 м (кривые 1–4). Прием выполнялся на $z = 50$ м, излучение — на $z_0 = 40$ м. Остальные условия, принятые при расчетах, те же, что и для рис. 5.

Из рис. 6 следует, что для всех мультиполей существенное влияние различия ХН проявляется до $r \sim 500$ –1000 м. При увеличении расстояния между приемником и излучателем рельеф кривых сглаживается, и влияние ХН мультиполей уменьшается. Вместе с тем, основные особенности, например, минимум ХН горизонтальных ДП или горизонтальных, в том числе, смешанных, КвП, сохраняются на всех расстояниях.

Видно также, что, как отмечалось выше, величина сигналов от вертикальных ДП и КвП из-за вертикальной направленности заметно меньше, чем для МП.

На рис. 7 для тех же условий, что и для рис. 5, сравниваются вертикальные сечения АП различных мультиполей с равными величинами моментов. Приведены результаты расчетов для различных траверзных расстояний. Комбинированный излучатель содержит набор мультиполей до второго порядка в некоторой комбинации.

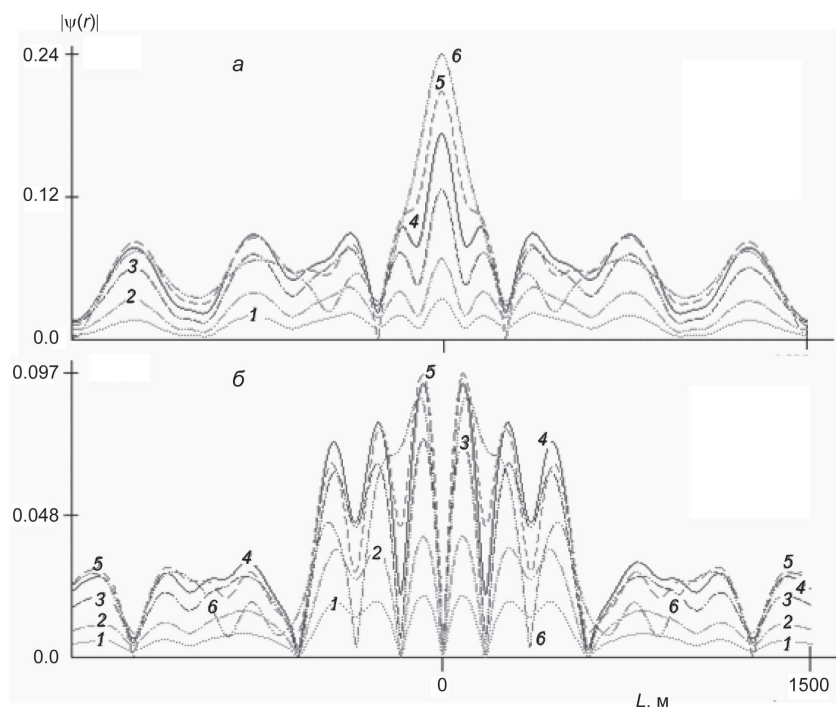


Рис. 5. Зависимость амплитуды потенциала МП (а) и амплитуды поля xz -КвП (б) от расстояния при разных глубинах приема, $f = 15$ Гц.
1 — 5 м, 2 — 10 м, 3 — 20 м, 4 — 30 м, 5 — 40 м, 6 — 50 м.

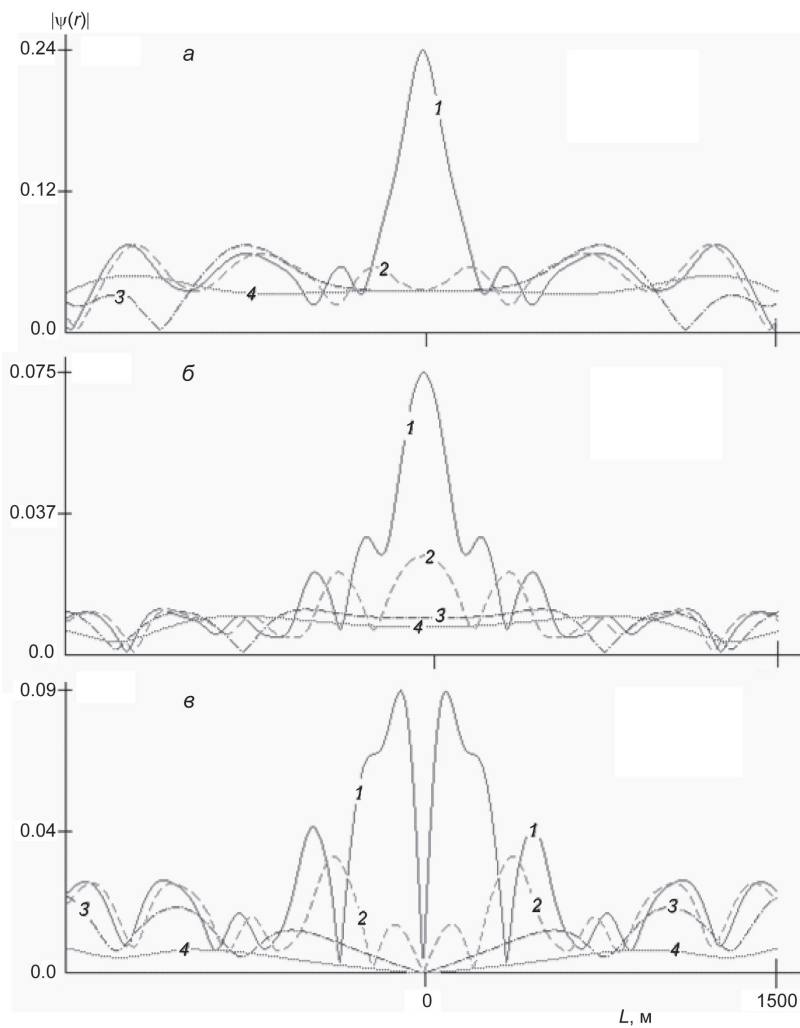


Рис. 6. Зависимость АП МП (а), амплитуды поля вертикального ДП (б) и АП смешанного КвП (в) от расстояния при различных траверзных расстояниях, $f = 15$ Гц. 1 — 100 м, 2 — 300 м, 3 — 1000 м, 4 — 3000 м.

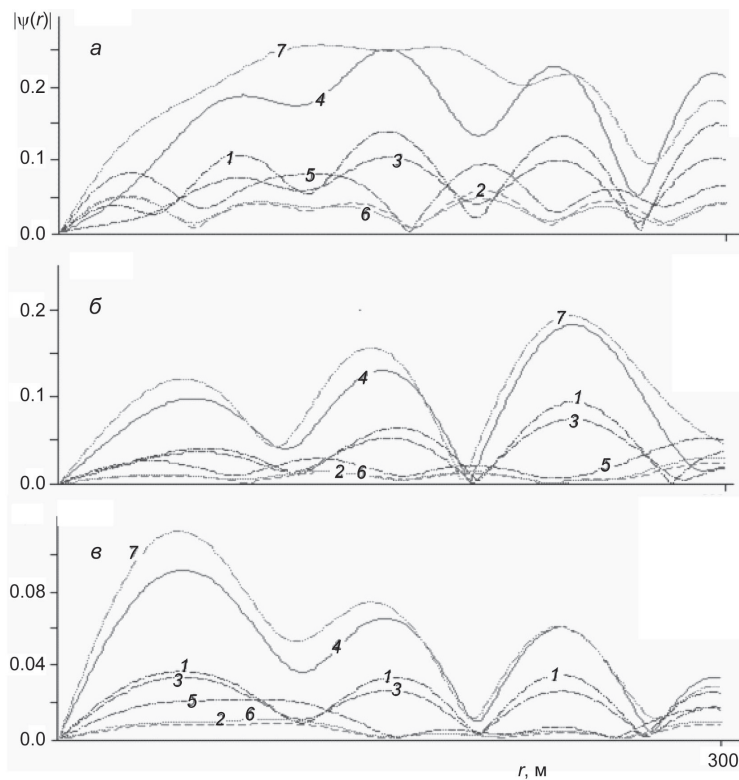


Рис. 7. Вертикальные сечения АП на расстоянии от источника 100 м (а), 1000 м (б) и 3000 м (в), $f = 15$ Гц. Обозначения см. на рис. 2, 7 — комбинированный излучатель.

Видно, что, начиная с расстояния в десять длин волн, практически совпадают графики амплитуд поля от МП (кривая 1) и у-ДП (кривая 3), а также графики АП от z-ДП (кривая 2), yz-КвП (кривая 5) и zz-КвП (кривая 6). Это хорошо согласуется с результатами, приведенными на рис. 2–4, где зависимости АП от расстояния внутри двух групп: МП, у-ДП и xx-yy-КвП или z-ДП, yz-КвП и zz-КвП, имеют качественно и количественно одинаковые изменения.

Видно также, что в полном соответствии с рис. 5 на рис. 7 амплитуда сигнала уменьшается при уменьшении глубины. Это наблюдается как на малых, так и на больших расстояниях. Существенно, что при увеличении расстояния величина АП от всех мультиполей в придонной области также уменьшается быстрее, чем в середине волновода. Это также согласуется с выводами работ [14–17], где анализируются законы спадания сигналов от монополя. Эти выводы представляют интерес для установленных в придонной области стационарных систем обнаружения или измерения шумности целей.

В вертикальном сечении волновода видна интерференция мод, возбуждаемых различными мультиполями. Характер интерференции зависит от расстояния и типа ХН, но величина сигналов в середине волновода убывает при увеличении расстояния медленнее и монотонно. Например, на рис. 7 кривые 2 и 6 на всех расстояниях сохраняют минимум, а кривые 1, 3, 4 на всех расстояниях сохраняют интерференционный максимум. Это согласуется с рис. 2, 6 и 3, на которых при увеличении расстояния наблюдается сравнительно монотонное убывание величины сигналов, если приемник и излучатель расположены в середине волновода.

Обобщая результаты проведенных исследований, можно сделать следующие выводы.

В мелком море на инфразвуковых частотах формируется сложная, трудно предсказуемая интерференционная картина, существенно зависящая от типа мультиполя, частоты звука и глубин расположения излучателей и приемников. Характер интерференции на малых расстояниях ($r < h$) и больших расстояниях ($r > h$) различается, поскольку определяется различными физическими функциями влияния. С увеличением расстояния от излучателя происходит относительное уменьшение (сглаживание) интерференционных максимумов, что согласуется с [17], где установлено, что максимумы убывают в $\sqrt{r}$ раз быстрее, чем средний уровень регулярной составляющей поля [14, 15].

В середине волновода при равенстве горизонтов излучения и приема вариация величины сигналов из-за интерференции заметно меньше, а величина сигнала на заданной дистанции в среднем превышает сигналы от источников излучения, расположенных вблизи поверхностей раздела, или сигналов, принятых вблизи поверхностей раздела. Это различие формируется в ближней зоне и сохраняется на всех расстояниях.

В ближней зоне проявляется направленность мультиполей и характер изменения ориентации оси ХН на приемный элемент. Например, сигналы от горизонтальных диполей и квадруполей на отдельных участках могут возрастать даже при увеличении расстояния до источника. В этой зоне также заметно влияние дипольного эффекта, если приемники или излучатели расположены вблизи свободной поверхности и, в меньшей степени, вблизи дна. В результате при расположении мультиполей на этих глубинах уменьшается величина сигналов от всех мультиполей. Но для горизонтально ориентированных ДП и КвП этот эффект проявляется в меньшей степени, поскольку они в ближней зоне, практически, не взаимодействуют с поверхностями раздела.

На расстояниях, превышающих $(1-1.5)h$, формируются моды, и масштабы зон интерференционных максимумов, в основном, определяются амплитудами и фазами нормальных волн, зависящими от частоты и горизонтов расположения излучателей и приемников. Для монополя и горизонтально ориентированных диполя и квадруполя наблюдается сходственная интерференция с совпадающими по дистанции зонами максимумов и минимумов.

При увеличении расстояния изменяется соотношение амплитуд сигналов, образованных различными мультиполями. Сигналы от ДП и КвП с вертикальными осями симметрии убывают быстрее сигналов от остальных типов мультиполей. Из этого следует, что в низкочастотном поле подводных [11] и надводных источников, например, гражданских судов [13], влияние характерной направленности поля в вертикальной плоскости [1] при увеличении расстояния должно быстро уменьшаться. Однако в ближней зоне их влияние на суммарное поле необходимо обязательно

учитывать. Характерные особенности направленности поля в горизонтальной плоскости сохраняются и на больших расстояниях.

Величина сигналов в зонах интерференционных максимумов, как в ближней, так и в дальней зоне, существенно превышает средний уровень регулярной компоненты для всех МлП. Можно рекомендовать использовать эти зоны для решения задачи обнаружения слабых сигналов на фоне помех.

Рекомендуется выполнять в этих зонах измерения величины сигналов от реальных источников для оценки значений их приведенной шумности. Измерение звукового давления в зонах интерференционных максимумов и использование пространственно-частотных зависимостей передаточных функций волновода повышает помехоустойчивость пересчета измеренных величин в точку излучения. Одновременно устраняется [18, 19] смещение пересчитанных в точку излучения значений, например, по сравнению с оценками, использующими цилиндрический или сферический закон. Очевидно, что для корректного пересчета с использованием передаточной функции волновод должен быть откалиброван, в частности, должна быть выполнена идентификация параметров модели многослойного грунта [3, 9, 16].

Литература

1. Урик Р. Дж. Основы гидроакустики / Пер. с англ. Л.: Судостроение, 1978. 445 с.
2. Бреховских Л. М., Лысанов Ю. П. Теоретические основы акустики океана. М.: Наука, 2007. 369 с.
3. Кацнельсон Б. Г., Петников В. Г. Акустика мелкого моря. М.: Наука, 1997. 181 с.
4. Jensen F. B., Kuperman W. A., Porter M. B., Schmidt H. Computational ocean acoustics. American Institute of Physics: AIP Press, 1994.
5. Грачев Г. А., Кузнецов Г. Н. О средней скорости изменения фазы акустического поля вдоль плоского волновода // Акуст. журн. 1985. Т. 31, № 2. С. 266–268.
6. Кузнецов Г. Н., Лебедев О. В. О возможности применения модели эквивалентной плоской волны для повышения точности пеленгования низкочастотных сигналов в мелком море // Акуст. журн. 2012. Т. 58, № 3. С. 1–11.
7. Быковцев Г. И., Кузнецов Г. Н., Степанов А. Н. Акустическое поле направленного источника в океанических волноводах // ДАН СССР. 1985. Т. 280, № 1. С. 57–59.
8. Кузнецов Г. Н., Степанов А. Н. Поле эквивалентного мультипольного составного излучателя в волноводе // Акуст. журн. 2007. Т. 53, № 3. С. 377–385.
9. Никифоров С. Л., Попов В. А., Попов О. Е., Селезнев И. А. Концепция создания единой базы геоакустических данных морского дна и технологии геоакустического моделирования // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2010. № 3(9). С. 49–61.
10. Волженский М. Н., Родионов А. А., Семенов Е. В., Филатов Н. Н., Зимин А. В., Булатов М. Б. Опыт верификации оперативной модели для мониторинга гидрофизических полей Белого моря в 2004–2008 гг. // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2009. Т. 3, № 5. С. 33–41.
11. Пархоменко В. Н., Пархоменко В. В. Снижение шумности отечественных атомных подводных лодок в период с 1965 по 1995 год // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2012. Т. 5, № 2. С. 52–58.
12. Родионов А. А., Семенов Е. В., Зимин А. В. Развитие системы мониторинга и прогноза гидрофизических полей морской сред в интересах обеспечения скрытности и защиты кораблей ВМФ // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2012. Т. 5, № 2. С. 89–109.
13. Калью В. А., Таровик В. И., Чижов В. Ю. Уменьшение подводной шумности коммерческих судов — актуальная задача судовой акустики // Сб. тр. XXIV сес. РАО. Саратов, 2011. Т. 2. С. 218–222.
14. Грачев Г. А. Особенности затухания сигналов в мелком море // Акуст. журн. 1983. Т. 29, № 2. С. 275–277.
15. Гиндлер И. В., Петников В. Г. Затухание звука в многолучевом волноводе при различных горизонтах излучения и приема // Акуст. журн. 1987. Т. 33, № 2. С. 355–356.
16. Белов А. И., Кузнецов Г. Н. Экспериментальное исследование законов спада и интерференционной структуры скалярных и векторных полей в мелком море // XIII школа-семинар акад. Л. М. Бреховских «Акустика океана». XXIII сес. РАО. М.: ГЕОС, 2011. С. 13–16.
17. Грачев Г. А., Кузнецов Г. Н. Ослабление интерференционных максимумов акустического поля в мелком море // Акуст. журн. 1985. Т. 31, № 5. С. 675–678.
18. Baggeroer A. B., Kuperman W. A. Matched field processing in ocean acoustics // Acoustic signal processing for ocean exploration / Ed. J.M.F. Moura, I.M.G. Lourtie. Dordrecht; Boston; London: Kluwer Academic Publishers, 1992. P. 79–114.
19. Glebova G. M., Kuznetsov G. N. Estimating parameters of signal sources and characteristics of noise field by using spatially separated vector-scalar modules // The Formation of Acoustical Fields in Oceanic Waveguides, Reconstruction of Inhomogeneities in Shallow Water. Nizhny Novgorod: Inst. Appl. Phys., 1998. V. 1. P. 109–118.

Статья поступила в редакцию 01.04.2013 г.