

ОСОБЕННОСТИ ОСЛАБЛЕНИЯ НИЗКОЧАСТОТНОГО ЗВУКА ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ В 2D-ВОЛНОВОДЕ АРКТИЧЕСКОГО ТИПА СО СЛУЧАЙНОЙ БАТИМЕТРИЕЙ

О.Э. Гулин, И.О. Ярощук

Для низкочастотного звукового сигнала, распространяющегося в двумерно-неоднородном мелководном волноводе, в рамках метода поперечных сечений и на основе статистического моделирования рассмотрено влияние случайной батиметрии (флуктуирующей донной границы). Исследование проведено для условий мелкого моря, соответствующих шельфовым зонам российских арктических морей. Особенностью этих прибрежных акваторий является присутствие почти однородного водного слоя, лежащего на слабо консолидированных донных осадках с разнообразными характеристиками, в том числе с высокой степенью газонасыщенности. Модельные расчеты выполнены для условий сильно пропускающей статистически шероховатой донной границы с разными масштабами случайных неоднородностей. Показано, что влияние флуктуаций батиметрии на среднюю интенсивность звука имеет свои особенности по сравнению с влиянием случайных объемных неоднородностей скорости звука. В частности, уменьшение характерного масштаба флуктуаций донных шероховатостей приводит к усилению рассеяния и ослаблению звукового сигнала, а аналогичные крупномасштабные неоднородности донной границы мало изменяют картину распространения. В то же время при наличии объемных флуктуаций скорости звука в водном слое и осадках ранее было показано, что именно крупномасштабные неоднородности существенно влияют на распространение звукового сигнала, изменяя закон спада интенсивности.

Ключевые слова: двумерный мелководный волновод, случайно-шероховатая донная граница, метод поперечных сечений.

Введение

В настоящей работе рассмотрено влияние случайно шероховатой поверхности дна на энергетические потери при распространении низкочастотных акустических сигналов в двумерном волноводе мелкого моря. Рассеянию звука на шероховатых поверхностях посвящено большое количество работ, наиболее известные из которых перечислены в ссылках [1–10]. В них изложены основные подходы к приближенному теоретическому анализу проблемы. Наиболее распространенными аналитическими методами являются теория возмущений, метод Кирхгофа и метод интегрального уравнения. Для расчётов рассеянного поля как от объемных, так и от поверхностных неоднородностей среды подавляющее большинство

исследователей применяет лучевой метод, метод параболического уравнения (МПУ) и модовый подход. Как известно, лучевой метод применим только для высокочастотных полей, также он обременен вычислительными трудностями в местах точек поворота лучей и каустик. МПУ также вызывает трудности при описании областей фокусировки звука в волноводе [11], и, кроме того, со строгим учетом граничных условий для волноводов с неровными границами [12,13]. Среди работ, близких по постановке задачи к нашему исследованию, укажем [8, 9]. Однако публикаций по изучению особенностей спада средней интенсивности и других статистических характеристик звукового поля в волноводах с потерями и флуктуирующей границей раздела вода – донные осадки в литературе почти не встречается. Настоящее исследование

дование выполнено на основе статистического моделирования [14–16] средней интенсивности звука, описывающей энергетические потери при распространении сигнала в случайно-неоднородной среде мелкого моря. Решение для отдельных случайных реализаций параметров получается на основе универсального локально модового подхода, разработанного в [17–21]. В рамках этого подхода амплитуды мод ищутся на основе переформулировки исходной краевой задачи для уравнений акустики в причинные уравнения первого порядка. После этого, в приближении однонаправленного распространения (ОР) или рассеяния вперед, может быть в аналитическом виде записано представление решения для отдельных мод, составляющих поле в волноводе.

■ Математическая формулировка проблемы

Акустическое поле частоты ω в двумерно-неоднородном волноводе мелкого моря с неровной донной границей раздела H описывается линейными уравнениями акустики с граничными условиями на поверхности и дне волновода. В аксиально-симметричной постановке задачи при постоянной плотности ρ в водной толще для функции акустического давления p они сводятся к уравнению Гельмгольца следующего вида [5]:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + r^{-1} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} + \frac{\omega^2}{c^2} \right) p(r, z) = - \frac{\delta(r)\delta(z - z_0)}{2\pi r}, \quad (1)$$

где (r, z) – координаты цилиндрической системы, c – скорость звука в воде, а точечный источник излучения расположен при $r = 0, z = z_0$. Граничное условие на свободной поверхности $p(r, 0) = 0$, а условие на дне соответствует непрерывности давления и компоненты скорости, нормальной к границе $H(r)$. Также подразумевается выполнение условий излучения при $z, r \rightarrow \infty$. В волновой зоне источника, как известно [12, 13], поле давления $p(r, z)$ в (1) можно искать с помощью разложения по локальным модам нерегулярного 2D волновода:

$$p(r, z) = \sum_m G_m(r) \varphi_m(r, z);$$

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} \varphi_m(r, z) + [k^2 - \kappa_m^2(r)] \varphi_m(r, z) = 0. \quad (2)$$

В (2) $k = \omega/c, \kappa_m(r)$ – собственные значения, а φ_m – собственные функции задачи Штурма–Лиувилля ($m = 1, 2, \dots$), которые на поверхности и на дне океа-

на удовлетворяют следующим граничным условиям:

$$\begin{aligned} \varphi_m(r, 0) &= 0, \\ \varphi_m(r, H) + g_m(r)\varphi'_m(r, H) &= 0 \quad (\varphi'_m(r, H) = \\ &= (\partial\varphi_m(r, z)/\partial z)|_{z=H}). \end{aligned}$$

В последнем условии $g_m(r)$ характеризует импеданс проницаемого дна, а шероховатая граница $H(r)$ задается случайной функцией. При этом очевидно, что собственные функции и собственные значения, а также локальные моды волновода $G_m(r)\varphi_m(r, z)$ становятся случайными функциями r . Ранее было показано [22–24], что в нерегулярном волноводе в приближении рассеяния вперед (пренебрежение обратным рассеянием оправдано в силу малости случайных флуктуаций батиметрии) амплитуды мод $G_m(r)$ определяются следующим аналитическим видом решения ($\kappa_m r \gg 1$):

$$G_m(r) = A_m(r) \exp \left\{ \int_0^r \left[\sum_n a_n [V_{mn}(\xi) \left(\frac{\kappa_m(\xi)}{\kappa_n(\xi)} \right) - V_{nn}(\xi)] \right] d\xi \right\}, \quad (3)$$

где $a_m = \varphi_m(0, z_0) \exp[i\kappa_m(r)r]/2, A_m = i\varphi_m(0, z_0)[8\pi\kappa_m(r)r]^{-1/2}$. В представлении (3) $V(r)$ – матрица с элементами $V_{mn}(r) = \int_0^\infty \frac{\varphi_m(r, z)}{\rho(r, z)} \frac{\partial \varphi_n(r, z)}{\partial r} dz$. Матрицы $V(r), V^T(r)$

описывают межмодовое взаимодействие из-за горизонтальных изменений, вызванных случайной шероховатостью донной границы. Важно заметить, что для того, чтобы удовлетворялось требуемое условие непрерывности нормальной к границе $H(r)$ компоненты скорости, в решении (3) должна фигурировать матрица

$$V^T(r) = -V(r) - \int_0^\infty \varphi_m(r, z)\varphi_n(r, z) \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{\rho(r, z)} \right) dz$$

[13, 19]. В рамках метода поперечных сечений именно данная матрица обеспечивает правильный учет непрерывных (кусочно-непрерывных) изменений границы раздела $H(r)$ со скачкообразным изменением плотности при переходе через эту границу. В связи с вышесказанным для волноводов с переменной плотностью и неровной донной границей, исследованных в настоящей работе, известные приближенные методы, адиабатический ($V_{mn} = 0$) и модового параболического уравнения, строго не описывают граничное условие на неровной границе раздела $H(r)$. Данные приближения хорошо работают, только если плотность среды и границы не меняются в горизонтальном направлении. Тогда матрица $V(r)$ становится косимметрической: $V_{mn}(r) = -V_{nm}(r), V_{mm} = 0$ [24, 25], а выражение в экспоненте (3) упрощается.

Вычисляя поле давления $p(r, z)$ согласно уравнениям (2), (3) для каждой случайной реализации $H(r)$ из ансамбля N реализаций, нетрудно получить изменение средней интенсивности, или среднюю функцию потерь при распространении звука вдоль трассы в случайно-неоднородном волноводе:

$$\langle I \rangle = \langle |p|^2 \rangle = \sum_{m=1}^M \langle |G_m|^2 |\varphi_m|^2 \rangle + \sum_{(m \neq n)} \langle G_m G_n^* (\varphi_m \varphi_n^*) \rangle. \quad (4)$$

где M – максимальный номер моды, учитываемой при расчетах, а угловые скобки означают статистическое усреднение, которое при расчетах заменяется алгебраической формулой $\langle I \rangle = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N I_k$, I_k – интенсивность звукового сигнала в k -й реализации статистического ансамбля. По хорошо известным формулам также могут вычисляться другие интересные статистические характеристики интенсивности (индекс скинтилляций, корреляционные функции).

■ Модель стохастического волновода мелкого моря

Для проведения численного анализа была осуществлена привязка к значениям параметров, которые характерны для шельфовых зон арктических морей, в частности Карского моря [26, 27]. Рассматривался мелководный волновод, в котором происходит распространение тонального звукового сигнала частоты 250 Гц. Волновод имеет среднюю глубину $\langle H(r) \rangle = 40$ м, горизонтальную поверхность и случайно-шероховатое дно. В водном слое однородные

профили скорости звука $c = 1460$ м/с и плотности $\rho = 1.023$ г/см³. Дно представляет собой жидкое поглощающее полупространство неконсолидированных осадков с показателем преломления на границе раздела вода – дно $n = (c/c_1)(1 + ib_1)$, $b_1 = 0.02$. В донных осадках, следуя данным измерений, приведенным в [27], задаем импеданс посредством плотности $\rho_1 = 1.85$ г/см³ и скорости звука c_1 . Случайные шероховатости границы раздела вода – осадки $\delta h(r)$, $H(r) = \langle H \rangle + \delta h(r)$ (рис. 1, а, б) полагаем гауссовым случайным процессом с экспоненциальной корреляционной функцией: $B_h(r_2 - r_1) = \sigma_h^2 \exp(-|r_2 - r_1|/L_h)$. При постоянной скорости звука в водном слое функция импеданса $g_m(r)$ в граничном условии к уравнениям (2) определяется своими локальными значениями в поперечных сечениях волноводов сравнения Пекериса или любых иных волноводов сравнения, если $c = c(z)$.

■ Статистический анализ потерь при распространении

Статистическое моделирование средней интенсивности (4) выполнено для мелководного волновода с сильно проницаемой донной границей, $c_1 = c = 1460$ м/с, что часто наблюдается на шельфе арктических морей с повышенной газонасыщенностью в донных осадках [27]. В этом случае, как было показано в работах [23, 24] для объемных флуктуаций скорости звука в водном слое, а также для флуктуаций функции импеданса $g_m(r)$ в [16], при распространении звукового сигнала наблюдается максимальный статистический эффект. На основании сведений из

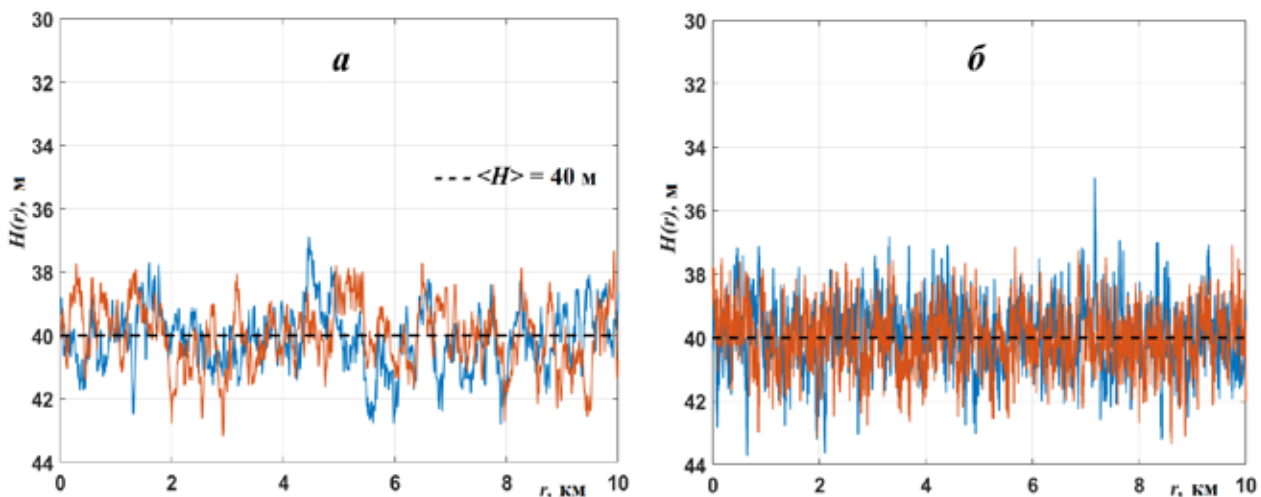


Рис. 1. Иллюстрация к модели стохастического волновода: а – две случайные реализации среднemasштабных ($L_h = 100$ м) флуктуаций $\delta h(r)$ границы раздела вода – донные осадки волновода; б – две случайные реализации мелкомасштабных флуктуаций $\delta h(r)$, $L_h = 20$ м

работы [27] и целей сравнения характерный масштаб изменения $H(r)$ рассматривался $L_h = 1$ км [28], $L_h = 100$ м и $L_h = 20$ м [8], а интенсивность флуктуаций полагалась $\sigma_h^2 = \langle(\delta h)^2\rangle = 1$ м². В процессе численного моделирования для получения надежного статистического результата при усреднении рассмотрен ансамбль реализаций $N = 10^3$. При расчетах отдельных реализаций принимались во внимание 6 мод, определяющих звуковое поле на дистанциях $r > 100$ м. Расстояния вблизи источника не представляют интереса с точки зрения изучения статистических эффектов. В плане типа мод, как и во всех предыдущих авторских работах [16–25], осуществлялась привязка к разрезу Пекериса на комплексной плоскости волновых чисел $k_m(r)$. Поэтому в рассматриваемом случае сильно проницаемой донной границы все моды оказываются вытекающими, их собственные значения комплексны и, кроме первого $k_1(r)$, имеют значительную мнимую часть. Первой моде присущ наибольший характерный масштаб затухания $L_{k1} \sim (\text{Im } k_1)^{-1} \approx 2$ км, тогда как для k_2 масштаб уже в 3 раза меньше, $L_{k2} \approx 630$ м, а $L_{k6} \approx 151$ м. На рис. 2–4 представлены численные результаты поведения средней интенсивности сигнала в водном слое случайно-неоднородного волновода. Из кривых, представленных на рис. 2–4, видно, что флуктуации батиметрии $\delta h(r)$, которые, как известно из литературы, рассеивают сигнал, увеличивают потери при распространении. Однако данный эффект для крупномасштабных неоднородностей $L_h = 1$ км в низкочастотной области оказывается весьма мал, составляя десятые доли децибела (см. вставку с увеличенным участком дистанции 9.5 км $< r < 10$ км в верхнем правом углу графика на рис. 2). Некоторое усиление эффекта до ≈ 0.5 –1 дБ к расстоянию 10 км наблюдается для среднего масштаба флуктуаций $L_h = 100$ м (см. рис. 3 и вставку в верхнем правом углу графика

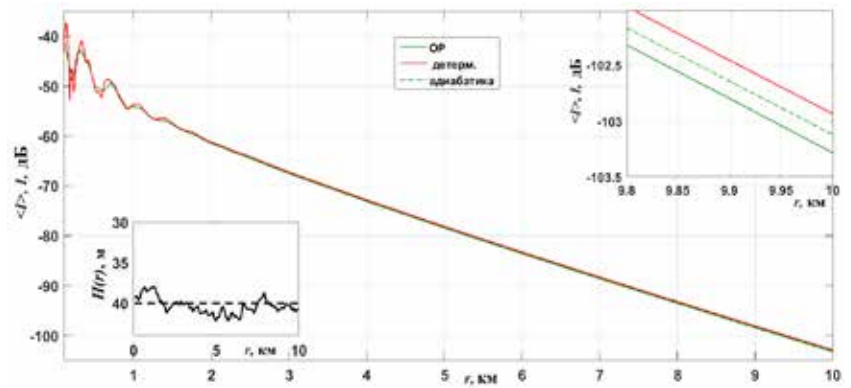


Рис. 2. Спадание средней интенсивности сигнала частоты 250 Гц в случайном волноводе с крупномасштабными флуктуациями донной границы (батиметрии), $L_h = 1$ км. На графике: кривая ОР – приближение рассеяния вперед, штриховая кривая – адиабатическое приближение, красная кривая – горизонтальная донная граница $H(\delta h = 0)$. $z_0 = z = 24$ м. Левый нижний угол – произвольная случайная реализация донной границы волновода

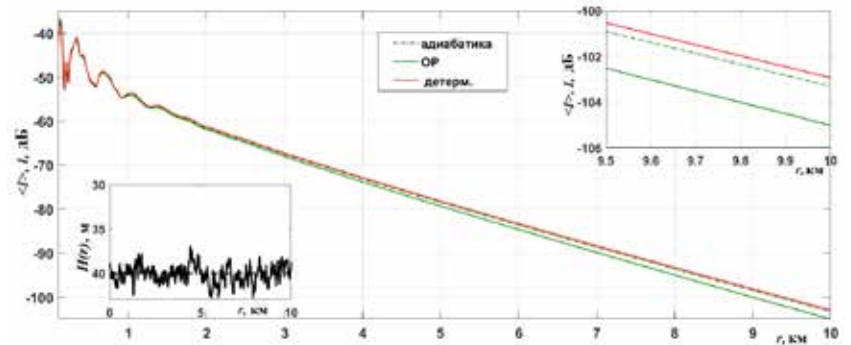


Рис. 3. Кривые аналогичны рис. 2, но масштаб неровностей донной границы $L_h = 100$ м

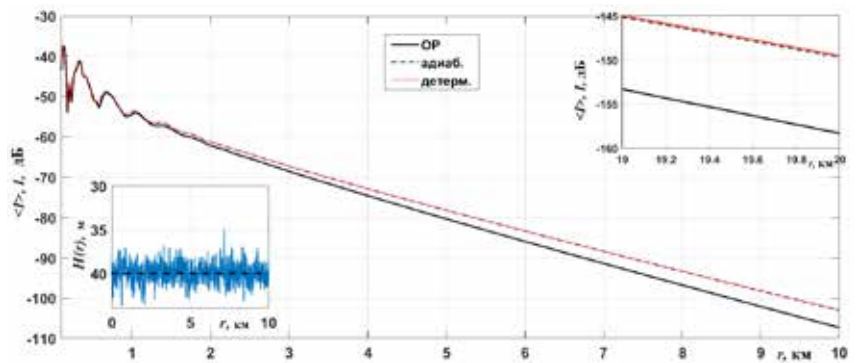


Рис. 4. Кривые аналогичны рис. 2,3, но для мелкомасштабных шероховатостей донной границы $L_h = 20$ м

ка). В этом случае «адиабатическое» рассеяние (кривая адиабатического приближения) почти не изменяется, а межмодовое взаимодействие возрастает. Благодаря этому акустическая энергия сигнала несколько интенсивнее уходит из водного слоя в донные осадки, соответственно кривая ОР слегка понижается относительно «адиабатической» кривой. Однако самая драматическая ситуация имеет место в случае мелкомасштабных шероховатостей границы H , ког-

да $L_h = 20$ м и становится сравним с длиной волны звука. В такой ситуации происходит интенсивный энергообмен между модами в волноводе. В результате звуковая энергия первой, наименее затухающей и самой энергонесущей моды, передается модам с более высокими номерами, которые вследствие высокой проницаемости донной границы весьма быстро уносят энергию из водного слоя в полупространство осадков. Потери средней интенсивности по сравнению с детерминированным случаем ровной горизонтальной границы при распространении сигнала достигают 5 дБ на дистанции ≈ 10 км (рис. 4). К расстоянию 20 км различие уровней кривых интенсивности приближается к 10 дБ (см. вставку в правом верхнем углу рис. 4).

Заключение

Таким образом, на основе статистического моделирования установлено, что случайные шероховатости сильно проницаемой донной границы волновода по-разному возмущают интенсивность распространяющегося сигнала в волноводе. Для крупномасштабных и среднемасштабных шероховатостей возмущающий эффект оказывается малозначителен вдоль всей трассы распространения. Для мелкомасштабных флуктуаций границы раздела вода – донные осадки характерно намного более сильное влияние, приводящее к значительным энергетическим потерям сигнала с расстоянием. Подчеркнем, что этот результат прямо противоположен влиянию на сигнал объемных случайных неоднородностей скорости звука, присутствующих в толще донных осадков мелководного шельфа арктических морей или в водном

слое морей более низких широт, имеющих стратификацию и возмущения в виде внутренних волн. Крупномасштабные объемные неоднородности скорости звука приводят не к усилению, а к ослаблению спада средней интенсивности в волноводе.

Основной вывод настоящего исследования в том, что при распространении низкочастотного (сотни герц и ниже) звука в типичных условиях мелкого моря влиянием крупномасштабных случайных шероховатостей донной границы (даже сильно проницаемой) на среднюю интенсивность можно пренебречь по сравнению с влиянием объемных неоднородностей скорости звука. Последние могут присутствовать либо в толще воды [5, 22–24, 26], либо для арктических волноводов – в жидких донных осадках [16, 25–27]. В то же время при наличии мелкомасштабных неровностей проницаемой донной границы эффект усиления потерь интенсивности характеризуется тем же порядком величины, что и эффект ослабления потерь интенсивности за счет крупномасштабных объемных неоднородностей скорости звука в мелком море. Поэтому пренебрегать влиянием мелкомасштабных флуктуаций границы на потери при распространении сигнала в волноводе на расстояниях более километра нельзя. По сравнению со случаем горизонтальной поверхности дна ошибка такого пренебрежения для интенсивности может превышать 5–10 дБ уже на сравнительно небольших расстояниях от источника.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Изучение фундаментальных основ возникновения, развития, трансформации и взаимодействия гидроакустических, гидрофизических и геофизических полей Мирового океана», номер гос. регистрации: АААА-А20-120021990003-3.

ЛИТЕРАТУРА

- Исакович М.А. Рассеяние волн от статистически шероховатой поверхности // ЖЭТФ. 1952. Т. 23. С. 305–314.
- Тамойкин В.В., Фрайман А.А. О статистических свойствах поля, рассеянного шероховатой поверхностью // Изв. вузов: Радиофизика. 1968. Т. 11. С. 56–61. DOI:10.1007/BF01033538.
- Кравцов Ю.А., Фукс И.М., Шмелев А.Б. Последовательное применение метода Кирхгофа к задаче о рассеянии звуковой волны на поверхности со случайными неровностями // Изв. вузов: Радиофизика. 1971. Т. 14. С. 854–861. DOI:10.1007/BF01033177.
- Басс Ф.Г., Фукс И.М. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. М.: Наука, 1972. 424 с.
- Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П. Теоретические основы акустики океана. Л.: Гидрометеоздат, 1982. 370 с.
- Kuperman W.A., Schmidt H. Rough surface elastic wave scattering in a horizontally stratified ocean // J. Acoust. Soc. Amer. 1986. Vol. 79. P. 1767–1777.
- Ogilvy J.A. Wave scattering from rough surface // Rep. Prog. Phys. 1987. Vol. 50. P. 1553–1608.
- Tracey B.H. and Schmidt H. Seismo-acoustic field statistics in shallow water // IEEE J. Ocean. Eng. 1997. Vol. 22, No. 2. P. 317–331.
- Stotts S.A., Knobles D.P. and Koch R.A. Scattering in a Pekeris waveguide from a rough bottom using a two-way coupled mode approach // J. Acoust. Soc. Am. 2011. Vol. 129, No. 5. EL172–178.
- Darmon M., Dorval V., Baque F. Acoustic scattering models from rough surfaces: a brief review and recent advances // Appl. Sci. 2020. V. 10 (22), 8305. DOI:10.3390/app10228305.
- Гулин О.Э. О векторных характеристиках акустических полей в статистически неоднородных волноводах // Акуст. журн. 1984. Т. 30, № 4. С. 460–466.
- Jensen F.B., Kuperman W.A., Porter M.B., Schmidt H. Computational Ocean Acoustics. New York, USA: Springer, Dordrecht, The Netherlands; Heidelberg, Germany; London, UK, 2011.

13. Бреховских Л.М., Годин О.А. Звуковые поля в слоистых и трехмерно-неоднородных средах. Акустика неоднородных сред. Т. 2. М.: Наука, 2009.
14. Ярошук И.О., Гулин О.Э. Метод статистического моделирования в задачах гидроакустики. Владивосток: Дальнаука, 2002.
15. Gulin O.E., Yaroshchuk I.O. Simulation of underwater acoustical field fluctuations in shallow sea with random inhomogeneities of sound speed: depth-dependent environment // *J. Comp. Acoust.* 2014. Vol. 22, 1440002. DOI:10.1142/S0218396X14400025.
16. Zhu F., Gulin O.E., Yaroshchuk I.O. Average intensity of low-frequency sound and its fluctuations in a shallow sea with a range-dependent random impedance of the liquid bottom // *Appl. Sci.* 2021. Vol. 11 (23), 11575. DOI:10.3390/app112311575.
17. Гулин О.Э. Об уравнениях первого порядка для исследования акустических полей океана с существенными горизонтальными неоднородностями // Докл. АН. 2005. Т. 400, № 4. С. 542–545.
18. Гулин О.Э. К расчетам низкочастотных акустических полей в нерегулярных волноводах при наличии сильного обратного рассеяния // *Акуст. журн.* 2008. Т. 54, № 4. С. 575–586. DOI:10.1134/S106377100804009X.
19. Гулин О.Э. Моделирование распространения низкочастотного звука в нерегулярном мелководном волноводе с жидким дном // *Акуст. журн.* 2010. Т. 56, № 5. С. 642–650. DOI:10.1134/S1063771010050143.
20. Gulin O.E. The contribution of a lateral wave in simulating low-frequency sound fields in an irregular waveguide with a liquid bottom // *Acoust. Phys.* 2010. Vol. 56, No. 5. P. 613–622. DOI:10.1134/S1063771010050027.
21. Gulin O.E., Yaroshchuk I.O. Simulation of underwater acoustical field fluctuations in range-dependent random environment of shallow sea // *J. Comp. Acoust.* 2014. Vol. 22, 1440006. DOI:10.1142/S0218396X14400062.
22. Гулин О.Э., Ярошук И.О. Особенности энергетической структуры акустических полей в океане с двумерными случайными неоднородностями // *Акуст. журн.* 2017. Т. 63, № 2. С. 158–164.
23. Гулин О.Э., Ярошук И.О. Зависимость средней интенсивности низкочастотного акустического поля от параметров дна мелкого моря с объемными случайными неоднородностями водного слоя // *Акуст. журн.* 2018. Т. 64, № 2. С. 186–189.
24. Zhu F., Gulin O.E., Yaroshchuk I.O. Statistical patterns of transmission losses of low-frequency sound in shallow sea waveguides with Gaussian and non-Gaussian fluctuations // *Appl. Sci.* 2019. Vol. 9 (9), No. 1841. DOI:10.3390/app9091841.
25. Gulin O.E., Yaroshchuk I.O. On average losses of low-frequency sound in a two-dimensional shallow-water random waveguide // *J. Mar. Sci. Eng.* 2022. Vol. 10 (6), No. 822. DOI: 10.3390/jmse10060822.
26. Katsnelson B., Petnikov V., Lynch J. *Fundamentals of Shallow Water Acoustics.* New York, USA: Springer, 2012.
27. Григорьев В.А., Петников В.Г., Росляков А.Г., Терехина Я.Е. Распространение звука в мелком море с неоднородным газонасыщенным дном // *Акуст. журн.* 2018. Т. 64, № 3. С. 342–358.
28. Tang X., Tappert F.D., Creamer D.B. Simulations of large acoustic scintillations in the Straits of Florida // *J. Acoust. Soc. Am.* 2006. Vol. 120, No. 6. P. 3539–3552.

Об авторах

ГУЛИН Олег Эдуардович, д. физ.-мат. н., ведущий научный сотрудник

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук

Адрес: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, д. 43

Область научных интересов: акустика океана, теория и математическое моделирование низкочастотных волновых процессов в слоистых, нерегулярных, случайных средах, метод поперечных сечений.

Тел.: +7(423) 231-26-17. Факс: +7(423) 231-26-17

E-mail: gulinoe@poi.dvo.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1132-7354>

ЯРОШУК Игорь Олегович, д. физ.-мат. н., старший научный сотрудник, зав. лабораторией

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук

Адрес: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, д. 43

Область научных интересов: статистическая гидроакустика, статистическое моделирование, сейсмоакустика, океанология

Тел.: +7(423) 231-26-17. Факс: +7(423) 231-26-17

E-mail: yaroshchuk@poi.dvo.ru

<https://orcid.org/0000-0002-3212-9752>

Для цитирования:

Гулин О.Э., Ярошук И.О. ОСОБЕННОСТИ ОСЛАБЛЕНИЯ НИЗКОЧАСТОТНОГО ЗВУКА ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ В 2D-ВОЛНОВОДЕ АРКТИЧЕСКОГО ТИПА СО СЛУЧАЙНОЙ БАТИМЕТРИЕЙ // *Подводные исследования и робототехника.* 2023. №. 2 (44). С. 67–74. DOI: 10.37102/1992-4429_2023_44_02_06. EDN: TIAУКК.

PECULIARITIES OF ATTENUATION OF LOW-FREQUENCY SOUND IN THE COURSE OF PROPAGATION IN A 2D ARCTIC-TYPE WAVEGUIDE WITH RANDOM BATHYMETRY

O.E. Gulin, I.O. Yaroshchuk

For a low-frequency sound signal propagating in a two-dimensionally inhomogeneous shallow-water waveguide, the influence of random bathymetry (fluctuating bottom boundary) is considered based on the local-mode approach and statistical modeling. The study was carried out for shallow sea conditions corresponding to the coastal waveguides of Russian Arctic seas. A feature here is the presence of an almost homogeneous water layer with various characteristics of bottom sediments. For conditions of a bottom boundary that is strongly penetrable, calculations predict a very weak effect of bathymetry fluctuations on the average sound intensity. A feature of these coastal areas is the presence of an almost homogeneous water layer lying on weakly consolidated bottom sediments with various characteristics, including those with a high degree of gas saturation. Model calculations were performed for the conditions of a strongly penetrable statistically rough bottom boundary with different scales of random inhomogeneities. It is shown that the effect of bathymetry fluctuations on the average sound intensity has its own characteristics compared to the effect of random volumetric inhomogeneities of the speed of sound. In particular, a decrease in the characteristic scale of bottom roughness fluctuations leads to an increase in scattering and a decrease in the sound signal, while similar large-scale inhomogeneities of the bottom boundary change the propagation pattern a little. At the same time, in the presence of volume fluctuations in the speed of sound in the water layer and sediments, it was previously shown that it is large-scale inhomogeneities that significantly affect the propagation of a sound signal, changing the intensity decay law.

Keywords. Two-dimensional shallow-water waveguide, randomly rough bottom boundary, method of local modes.

References

1. Isakovich M.A. Scattering of waves from a statistically rough surface. *J. Exper. Theor. Phys.* 1952. Vol. 23. P. 305–314.
2. Tamoikin V.V., Fraiman A.A. The statistical properties of a field scattered by a rough surface. *Radiophys. Quantum Electron.* 1968. Vol. 11. P. 31–36. <https://doi.org/10.1007/BF01033538>.
3. Kravtsov Y.A., Fuks I.M., Shmelev A.B. Successive application of the Kirchhoff method to the problem of the scattering of a sound wave by a surface having random roughness. *Radiophys. Quantum Electron.* 1971. Vol. 14. P. 672–679. <https://doi.org/10.1007/BF01033177>.
4. Bass F., Fuks I. *Waves Scattered from Statistically Rough Surfaces*. Pergamon: Oxford, Great Britain, 1979.
5. Brekhovskikh L., Lysanov Yu. *Fundamentals of Ocean Acoustics*. Springer-Verlag: Berlin, Germany, New York, USA, 1982.
6. Kuperman W.A., Schmidt H. Rough surface elastic wave scattering in a horizontally stratified ocean. *J. Acoust. Soc. Amer.* 1986. Vol. 79. P. 1767–1777.
7. Ogilvy J.A. Wave scattering from rough surface. *Rep. Prog. Phys.* 1987. Vol. 50. P. 1553–1608.
8. Tracey B.H. and Schmidt H. Seismo-acoustic field statistics in shallow water. *IEEE J. Ocean. Eng.* 1997. Vol. 22, No. 2. P. 317–331.
9. Stotts S.A., Knobles D.P. and Koch R.A. Scattering in a Pekeris waveguide from a rough bottom using a two-way coupled mode approach. *J. Acoust. Soc. Am.* 2011. Vol. 129, No. 5. EL172–178.
10. Darmon M., Dorval V., Baque F. Acoustic scattering models from rough surfaces: a brief review and recent advances. *Appl. Sci.* 2020. Vol. 10 (22), 8305. <https://doi.org/10.3390/app10228305>.
11. Gulin O.E. Vector characteristics in statistically inhomogeneous waveguides. *Sov. Phys. Acoust.* 1984. Vol. 30, No. 4. P. 276–279.
12. Jensen F.B., Kuperman W.A., Porter M.B., Schmidt H. *Computational Ocean Acoustics*. Springer: New York, USA; Dordrecht, The Netherlands; Heidelberg, Germany; London, UK, 2011.
13. Brekhovskikh L.M., Godin O.A. *Sound Fields in Layered and Three-Dimensional Inhomogeneous Media*. In *Acoustics of Inhomogeneous Media*. Vol. 2. Nauka: Moscow, Russia, 2009.
14. Yaroshchuk I.O., Gulin O.E. *Statistical Modeling Method for Hydroacoustic Problems*. Dalnauka: Vladivostok, Russia, 2002.
15. Gulin O.E., Yaroshchuk I.O. Simulation of underwater acoustical field fluctuations in shallow sea with random inhomogeneities of sound speed: depth-dependent environment. *J. Comp. Acoust.* 2014. Vol. 22, 1440002. <https://doi.org/10.1142/S0218396X14400025>.

16. Zhu F., Gulin O.E., Yaroshchuk I.O. Average intensity of low-frequency sound and its fluctuations in a shallow sea with a range-dependent random impedance of the liquid bottom. *Appl. Sci.* 2021. Vol. 11 (23), 11575. <https://doi.org/10.3390/app112311575>.

17. Gulin O.E. First-order equations to study acoustic fields in ocean with significant horizontal heterogeneities. *Dokl. Earth Sci.* 2005. Vol. 400, No. 1. P. 173–175.

18. Gulin O.E. Calculation of low-frequency sound fields in irregular waveguides with strong backscattering. *Acoust. Phys.* 2008. Vol. 54. P. 495–505. <https://doi.org/10.1134/S106377100804009X>.

19. Gulin O.E. Simulation of low-frequency sound propagation in an irregular shallow-water waveguide with a fluid bottom. *Acoust. Phys.* 2010. Vol. 56. P. 684–692. <https://doi.org/10.1134/S1063771010050143>.

20. Gulin O.E. The contribution of a lateral wave in simulating low-frequency sound fields in an irregular waveguide with a liquid bottom. *Acoust. Phys.* 2010. Vol. 56. P. 613–622. <https://doi.org/10.1134/S1063771010050027>.

21. Gulin O.E., Yaroshchuk I.O. Simulation of underwater acoustical field fluctuations in range-dependent random environment of shallow sea. *J. Comp. Acoust.* 2014. Vol. 22, 1440006. <https://doi.org/10.1142/S0218396X14400062>.

22. Gulin O.E., Yaroshchuk I.O. Features of the energy structure of acoustic fields in the ocean with two-dimensional random inhomogeneities.

Acoust. Phys. 2017. Vol. 63. P. 168–174. <https://doi.org/10.1134/S1063771017020051>.

23. Gulin O.E., Yaroshchuk I.O. Dependence of the mean intensity of a low-frequency acoustic field on the bottom parameters of a shallow sea with random volumetric water-layer inhomogeneities. *Acoust. Phys.* 2018. Vol. 64. P. 186–189. <https://doi.org/10.1134/S1063771018020069>.

24. Zhu F., Gulin O.E., Yaroshchuk I.O. Statistical patterns of transmission losses of low-frequency sound in shallow sea waveguides with Gaussian and non-Gaussian fluctuations. *Appl. Sci.* 2019. Vol. 9 (9), 1841. <https://doi.org/10.3390/app9091841>.

25. Gulin O.E., Yaroshchuk I.O. On average losses of low-frequency sound in a two-dimensional shallow-water random waveguide. *J. Mar. Sci. Eng.* 2022. Vol. 10 (6), 822. <https://doi.org/10.3390/jmse10060822>.

26. Katsnelson B., Petnikov V., Lynch J. *Fundamentals of Shallow Water Acoustics*. Springer: New York, USA, 2012.

27. Grigor'ev V.A., Petnikov V.G., Roslyakov A.G., Terekhina Y.E. Sound propagation in shallow water with an inhomogeneous gas-saturated bottom. *Acoust. Phys.* 2018. Vol. 64. P. 331–346. <https://doi.org/10.1134/S1063771018030053>.

28. Tang X., Tappert F.D., Creamer D.B. Simulations of large acoustic scintillations in the Straits of Florida. *J. Acoust. Soc. Am.* 2006. Vol. 120, No. 6. P. 3539–3552.

About the authors

GULIN Oleg Eduardovich, Doctor of sciences, physics and mathematics, Leading researcher

Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences

Address: 43, Baltiyskaya st., Vladivostok, 690041, Russia

Scientific fields: Scientific fields: ocean acoustics, theory and mathematical simulation of low-frequency wave processes in the layered, irregular, random media, method of local modes.

Phone: +7(423) 231-26-17. **Fax:** +7(423) 231-26-17

E-mail: gulinoe@poi.dvo.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1132-7354>

YAROSHCHUK Igor Olegovich, Doctor of sciences, physics and mathematics, Senior researcher, Head of the Laboratory

Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences

Address: 43, Baltiyskaya st., Vladivostok, 690041, Russia

Scientific fields: statistical hydroacoustics, statistical modeling, seismoacoustics, oceanology

Phone: +7(423) 231-26-17. **Fax:** +7(423) 231-26-17

E-mail: yaroshchuk@poi.dvo.ru

<https://orcid.org/0000-0002-3212-9752>



Recommended citation:

Gulin O.E., Yaroshchuk I.O. PECULIARITIES OF ATTENUATION OF LOW-FREQUENCY SOUND IN THE COURSE OF PROPAGATION IN A 2D ARCTIC-TYPE WAVEGUIDE WITH RANDOM BATHYMETRY. *Underwater investigations and robotics*. 2023. No. 2 (44). P. 67–74. DOI: 10.37102/1992-4429_2023_44_02_06. EDN: TIAYKK.